Marzo 2021 • N.º 534 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EL AUTÉNTICO *DILOPHOSAURUS* | INMUNOLOGÍA DE LA COVID-19 | DECLIVE DE LAS MARIPOSAS MEDITERRÁNEAS
MARZO 2021 N.º 534

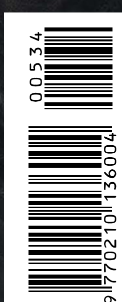
MEDIOAMBIENTE
La importancia de las reservas de agua de montaña

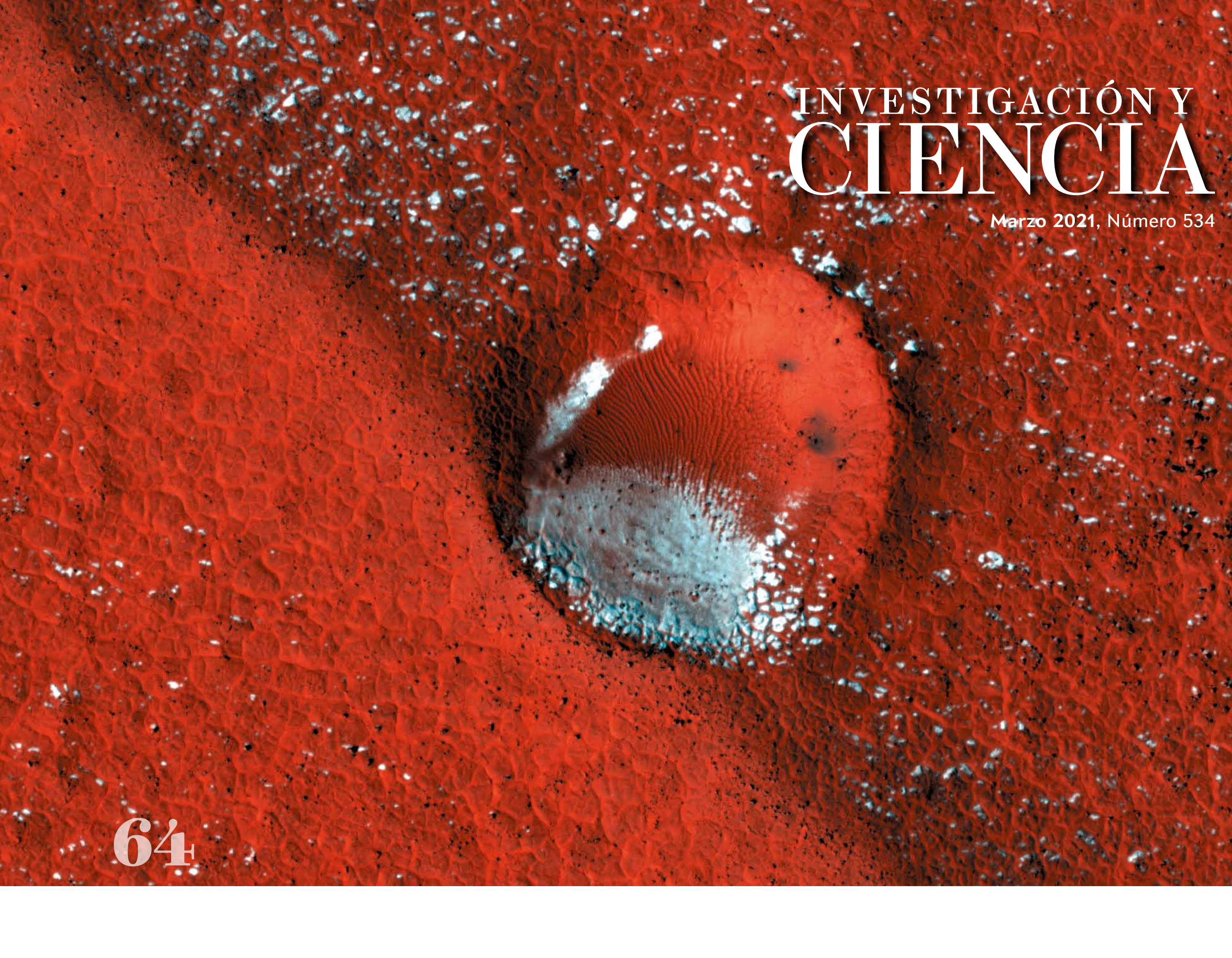
ECOLOGÍA
El declive de las mariposas mediterráneas

COVID-19
Inmunología del nuevo coronavirus

DINOSAURIO DE PELÍCULA

Estudios recientes sobre *Dilophosaurus* ofrecen una nueva visión de este icono de *Parque Jurásico*





ARTÍCULOS

NASA, JPL Y UNIVERSIDAD DE ARIZONA



55



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La película *Parque Jurásico* hizo famoso al *Dilophosaurus* antes de que los científicos tuvieran un conocimiento profundo de este dinosaurio. El análisis de nuevos fósiles ha proporcionado la imagen más detallada que se tiene hasta la fecha de un dinosaurio de su época. Los datos han revelado que era un depredador ágil y de gran tamaño que cazaba a otros dinosaurios. Ilustración de Chase Stone.



redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2021

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y PROTEÍNAS

Me ha parecido muy interesante el artículo de Ewen Callaway «Inteligencia artificial y plegamiento de proteínas» [Investigación y Ciencia, febrero de 2021]. Sin embargo, hay un aspecto que el artículo menciona solo muy por encima y que considero muy importante: ¿qué parte del algoritmo se basa en la interpolación (aprendizaje) y cuál corresponde a las predicciones basadas en modelos físicos?

Cuanto menos basado en la interpolación de datos conocidos sea el proceso, más importante y fundamental será este salto hacia adelante. Este trabajo es una clara prueba de que la inteligencia artificial se va adentrando en todas las ramas de la ciencia. Pero no olvidemos que se trata de un arma de doble filo. Por un lado, la inteligencia artificial nos permite estudiar situaciones muy complejas, en las que las relaciones entre subsistemas no son obvias y las cuales nunca detectaríamos sin su ayuda. Pero, por otro, estas herramientas pueden convertirse en cajas negras, de forma que dejemos de preguntarnos sobre los principios fundamentales relacionados con los fenómenos físicos que rigen los sistemas complejos.

Oriol Vendrell
Cátedra de Química Teórica
Universidad de Heidelberg

LA QUÍMICA EN *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

Investigación y Ciencia es, sin duda, la revista de referencia de divulgación científica en español. A través de sus páginas es posible estar al día de los principales avances de la investigación en física, medicina, biología y todas las ciencias con un impacto importante. ¿Todas? No. Una parte, no precisamente pequeña, se resiste a ser reconocida, y no por voluntad de esa ciencia: la química.

Ya desde un primer momento, en las distintas secciones de la web de la revista queda claro que el papel que se le da a la química es el de un mero apéndice de la física, cual libro de segundo de ESO que reserva la química a las últimas clases de la asignatura de física (si sobra tiempo). Sorprende este hecho cuando la química es la ciencia central en infinidad de aplicaciones presentes y futuras, una centralidad aún mayor que el de la física, en mi opinión (y en la de muchos expertos en filosofía de la ciencia). Esta visión reduccionista que consideraba la química como una parte menor de la física fue superada hace tiempo, como se puede ver en los trabajos de Alexandru Balaban y Douglas J. Klein, por ejemplo.

Parece que cada cierto tiempo hay que recordar que la química es fundamental en aspectos tan diversos como la lucha contra el cambio climático, la nanomedicina, la computación cuántica, la explicación del origen de la vida o el desarrollo de vacunas (como varias de las vacunas para la COVID-19 nos muestran). Sin embargo, en Investigación y Ciencia, la química y la teoría de cuerdas están al mismo nivel de importancia. Que nadie se ofenda, pero resulta sorprendente.

> «La visión reduccionista que consideraba la química como una parte menor de la física fue superada hace tiempo»
> —*Fernando Herranz (CSIC)*

Como asiduo lector de Investigación y Ciencia y como químico, creo que la calidad e impacto de la revista sería aún mayor que el que tiene ahora si corrigiera este, en mi opinión, extraño error.

Fernando Herranz
Instituto de Química Médica (CSIC)
Madrid

Responden los editores: *Agradecemos el comentario. Una cuestión que afecta a la divulgación de la química es que, debido precisamente al carácter ubicuo de esta ciencia, sus avances se perciben a menudo como asociados a otras áreas de conocimiento. Un ejemplo representativo lo aportan los premios Nobel de química concedidos en los últimos años. Todos los descubrimientos relacionados han sido tratados en* Investigación y Ciencia *con anterioridad a la concesión del galardón, si bien es cierto que a menudo se han presentado vinculados a otras ramas: genética (CRISPR), energía (baterías de litio), biotecnología (evolución dirigida de proteínas), etcétera.*

En Investigación y Ciencia *somos plenamente conscientes de que la química es, precisamente por su transversalidad, una de las ciencias con mayor impacto en la sociedad. En 2011, Año Internacional de la Química, la revista publicó cada mes —y en abierto en la web— contenidos relacionados con el desarrollo y las aplicaciones de esta ciencia, y en diciembre un informe especial conmemorativo. A lo largo de 2019, Año Internacional de la Tabla Periódica, publicamos una serie de artículos sobre la historia y evolución de esta obra emblemática, que luego recopilamos en un monográfico. La lista de contenidos sobre química es larga y seguirá creciendo.*

En cuanto a las secciones de la web, es importante señalar que estas no pretenden establecer ninguna clasificación jerárquica de áreas de conocimiento. Se basan en los criterios de búsqueda que intuitivamente emplean los usuarios, y su objetivo es facilitar dichas búsquedas y la navegación a través de nuestros contenidos.

No obstante todo lo anterior, es cierto que, en comparación con otras disciplinas, la química cuenta con una percepción pública que no está a la altura del papel central que desempeña como ciencia. Como medio de divulgación, Investigación y Ciencia *debería contribuir más a superar esa grieta.*

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Valencia 307, 3.º 2.ª, 08009 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



El primer genoma de pulpo secuenciado fue el del pulpo ocelado de California (*en la fotografía*).





JOEL SARTORE

BIOLOGÍA

El pulpo, un animal modelo

El cerebro voluminoso de este cefalópodo puede ayudar a desentrañar la evolución y la neurobiología de la inteligencia y la complejidad, entre otros rasgos

Los humanos mantenemos un parentesco más estrecho con los dinosaurios que con los pulpos. Hace 500 millones de años que nuestro linaje se separó del de los cefalópodos, la clase de los invertebrados a la que pertenecen el pulpo, el calamar o la sepia. Su cerebro carece de todas las grandes partes anatómicas que son propias del encéfalo de los vertebrados. La mayoría de sus neuronas están repartidas por los tentáculos, en lugar de concentrarse en la cabeza.

Pese a ello, son animales sumamente inteligentes, dotados de un cerebro desproporcionadamente grande en comparación con su talla corporal, un rasgo en el que solo se ven superados por las aves y los mamíferos. Hacen gala de comportamientos cognitivos de alto nivel, como el uso de útiles y la resolución de problemas, incluso averiguan el modo de desenroscar las tapas de los frascos para acceder a la comida de su interior [*véase* «El ingenio de los cefalópodos», por Ángel Guerra; Investigación y Ciencia, mayo de 2019]. Los científicos cada vez están más convencidos de que la combinación de ingenio y la gran distancia que les separa de los humanos puede convertirlos en un modelo ideal para deducir las reglas comunes que rigen las funciones cerebrales complejas; además, puede revelar las innovadoras soluciones neurológicas que estos tentaculados han desarrollado de modo singular.

Así se sumarían al elenco de animales que, como la mosca del vinagre *Drosophila*, la rata, el pez cebra o el nematodo *Caenorhabditis elegans*, nos han brindado

amplios conocimientos biológicos. De todas estas especies modelo extensamente estudiadas que tienen en común su fácil crianza en el laboratorio, los roedores como el ratón han sido los más decisivos a la hora de averiguar el modo en que opera el cerebro.

«La ventaja del ratón reside en la notable semejanza de su cerebro con el humano, mientras que la del pulpo radica en su acusada diferencia», afirma Gül Dölen, neurocientífica de la Universidad Johns Hopkins. Los nematodos y las moscas del vinagre también resultan muy diferentes de los humanos, señala, pero el pulpo ensombrece a los demás invertebrados en lo que a complejidad se refiere. Conscientes de la oportunidad única que los cefalópodos brindan en virtud de sus enormes diferencias y al mismo tiempo su complejidad, Dölen y otros neurocientíficos están profundizando en su estudio para convertirlos en el organismo modelo más nuevo de la disciplina.

El primero en proponer el pulpo como organismo modelo con el que comparar nuestra especie fue el neurofisiólogo J. Z. Young, en los años sesenta del pasado siglo. La idea prosperó mucho más tarde, en 2015, cuando se secuenció el primer genoma de este molusco, en concreto el del pulpo ocelado de California (*Octopus bimaculoides*). «Un genoma entero ofrece una ingente cantidad de información que no se tenía antes», explica Cliff Ragsdale, neurobiólogo en la Universidad de Chicago y uno de los autores del estudio sobre el genoma, publicado en *Nature*.

Como en el caso de otras especies modelo, la publicación de su genoma allana el camino a modos esenciales de investigación, aseguran los investigadores. Entre ellos figuran el uso de la ingeniería genética para indagar en el funcionamiento del cerebro, saber con precisión dónde se expresan genes específicos y explorar la evolución mediante el cálculo de las diferencias entre los genes del pulpo y los de otras especies.

«Este es un momento realmente interesante para trabajar con estos animales sorprendentes», afirma Caroline Albertin, bióloga evolutiva del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, Massachusetts, y autora principal del estudio del genoma. «Tenemos ante nosotros un vasto océano de cuestiones que investigar.»

Con ese objetivo se han comenzado a desarrollar versiones «para cefalópodo» de las mismas herramientas moleculares que suelen emplear los que trabajan con ratones o moscas. El pasado verano, Albertin y sus colaboradores describieron en *Current Biology* la primera inactivación de un gen de cefalópodo para averiguar cuál era su cometido. Ahora el mismo equipo está trabajando en la activación de genes que, por ejemplo, permitirán insertar indicadores de actividad en las células del pulpo. De este modo podrán estudiar la función nerviosa del animal en tiempo real, afirma Joshua Rosenthal, investigador del Laboratorio de Biología Marina y uno de los autores del estudio. «Una vez que consigamos el próximo paso, creo que la comunidad explotará», afirma.

Las investigaciones ya se están acelerando. En 2018, Dölen y el coautor Eric Edsinger administraron éxtasis a pulpos y hallaron que, si bien de ordinario son antisociales,

GEOLOGÍA

Piedras arrojadas por tsunamis

Las grandes rocas que salpican una isla caribeña pudieron llegar a lomos de olas gigantes

La densa vegetación de la isla de Mona, un islote de Puerto Rico, esconde rocas del tamaño de un coche tachonadas de corales. Aunque los científicos ya escribieron sobre ellas a principios de la década de 1990, esas extrañas piedras cayeron en el olvido sin que nadie se decidiera a estudiar su origen. Ahora, los investigadores han vuelto a examinar estas moles y han llegado a la conclusión de que fueron arrojadas desde el mar por las enormes olas de un tsunami, provocado por un corrimiento de tierra submarino.

Muchas de esas rocas pueden verse desde el aire, pero la mayoría son casi inaccesibles por tierra, explica Bruce Jaffe, oceanógrafo del Centro de Ciencias Marinas y Costeras del Pacífico, en California. Jaffe recuerda cómo tuvo que abrirse camino entre las plantas venenosas de la isla, incluida una que puede producir ampollas y ceguera temporal. «Hemos pensado en regresar con trajes de protección especiales», asegura.

Los investigadores realizaron dos expediciones para inspeccionar más de 50 rocas, la mayor de las cuales superaba los 8 metros de largo. Las peñas aparecían diseminadas en un área extensa y a distancias de hasta 800 metros de la costa. Una tormenta seguramente no las habría lanzado tan lejos, asegura Jaffe; tuvo que intervenir un potente tsunami. Ricardo Ramalho, geólogo de la Universidad de Lisboa ajeno a la investigación, coincide con él. «Me sorprendería que fuera obra de una tormenta», afirma.

Otro miembro del equipo, el geocientífico Pedro Israel Matos Llavona, de la Universidad de Massachusetts Amherst, escudriñó mapas del fondo marino cercano y halló indicios de algo que podría haber desencadenado ese tsunami: una abrupta depresión de casi 4 kilómetros de ancho, causada por un antiguo corrimiento de tierra submarino. Matos Llavona llevó a cabo simulaciones del corrimiento y determinó que habría enviado olas de 10 metros sobre la isla de Mona, con la fuerza suficiente para lanzar piedras de muchas toneladas tierra adentro. Los científicos presentaron sus resultados en la reunión de otoño de 2020 de la Unión Geofísica Americana.

El equipo pretende identificar nuevas rocas usando un dron para detectar el calor que emiten tras pasar un día entero al sol. Según los investigadores, determinar cómo están repartidas podría servir para detectar huellas de tsunamis en otros lugares.

—*Katherine Kornei*



WILSON R. RAMÍREZ

responden al flujo del neutrotransmisor serotonina desatado por la droga de igual modo que las personas: se relajan y se hacen más sociables. Gracias al análisis del genoma, también confirmaron que posee los mismos transportadores de serotonina a los cuales se fija la droga en los vertebrados. Como explicaron en *Current Biology*, este descubrimiento apunta a que la sociabilidad guardaría relación con un mecanismo molecular más que a un centro nervioso concreto, radicado en el cerebro de los vertebrados.

Otros laboratorios están investigando el modo en que los tentáculos perciben e interactúan con el entorno, con un control mínimo por parte del cerebro. El pasado otoño se describió en *Cell* el descubrimiento de unos receptores especiales situados en las ventosas que detectan sustancias en las superficies que tocan, es decir, que dotan a sus brazos del sentido del gusto. «Ello demuestra que si queremos entender de veras cómo las adaptaciones celulares y moleculares dan lugar a funciones y características únicas en los seres vivos es preciso estudiar la vida en toda su variedad de formas y tamaños», asegura Nicholas Bellono, biólogo celular y molecular de la Universidad Harvard y autor senior del estudio.

Y pronto los investigadores tendrán más recursos a su alcance. En 2016, el Laboratorio de Biología Marina lanzó un programa de cría de cefalópodos destinado a la obtención de animales de experimentación. Albertin y el responsable del programa Bret Grasse están trabajando ahora con Dölen y otros colaboradores para secuenciar el genoma de *Octopus chierchiae*, una especie centroamericana del tamaño de una pelota de golf que es la principal candidata a servir como organismo modelo entre los pulpos. Sus pequeñas dimensiones la hacen ideal para la cría en el laboratorio y, a diferencia de otras especies, ya se domina su reproducción en cautividad.

Sin duda los cefalópodos nos reportarán más conocimientos básicos de biología fundamental, a los que podrían seguir avances tecnológicos. A los investigadores de materiales les interesa la piel por sus increíbles dotes de camuflaje, y los informáticos tal vez podrán sacar algún día provecho de los sistemas independientes de memoria y aprendizaje de los pulpos, uno para la visión y otro para las sensaciones táctiles, como elementos para nuevas estrategias de aprendizaje automático.

El pulpo también podría inspirar avances en materia de ingeniería biomédica. Rosenthal está estudiando las tasas increíblemente altas de edición que muestra su ARN, fenómeno que quizás en el futuro conduzca a nuevas técnicas con las que eliminar mutaciones indeseadas en el genoma humano. Y Ragsdale, por su parte, investiga en este momento la portentosa capacidad regeneradora de los tentáculos, los cordones nerviosos y otras partes del cuerpo, lo que algún día podría contribuir a tratamientos para personas que han perdido una extremidad o han sufrido lesiones cerebrales o espinales. «La vida ya ha descubierto soluciones para casi todo. Solo hay que encontrarlas», concluye Rosenthal.

—Rachel Nuwer

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Cetáceo imitador

Los calderones comunes australianos sabrían imitar las voces de las orcas

Los calderones comunes, o ballenas piloto (*Globicephala melas*), que pueblan las aguas australes son mamíferos marinos que tienen mucho que decir: podrían emplear las vocalizaciones para burlar a su enemigo mortal.

Los cetáceos, el grupo del que forman parte las ballenas, los delfines y las marsopas, se comunican por medio de sonidos para buscar alimento y pareja, orientarse y relacionarse entre sí. Las vocalizaciones varían de una especie a otra y entre comunidades de la misma especie. Era sabido que podían imitar ciertos sonidos artificiales, como los del sónar, pero nadie había grabado jamás una imitación de otro cetáceo. Ahora un nuevo estudio ha hallado coincidencias en el repertorio sonoro del calderón.

Como parte del primer estudio minucioso de los sonidos de este cetáceo, realizado en las aguas australianas, los investigadores escucharon 2028 vocalizaciones y cuál fue su sorpresa al descubrir que 19 eran parecidas a las emitidas por las orcas, rivales de los calderones. «Escuchamos algunas llamadas que son, para el oído humano, idénticas a las de las orcas de esa zona», explica Christine Erbe, directora del Centro de Ciencia y Tecnología Marina de la Universidad Curtin, en Perth y una de las autoras del estudio, publicado en *Scientific Reports*.

Es frecuente ver a estas dos especies, las mayores entre los delfínidos, en los mismos entornos, con un tamaño similar y organizadas en manadas fuertemente cohesionadas, explica Charlotte Curé, investigadora de bioacústica del Centro de Estudios y Expertos sobre los Riesgos, el Ambiente, la Movilidad y la Vivienda (CEREMA), en Francia, que no ha participado en el estudio. Las orcas compiten por el alimento con los calderones y posiblemente también les dan caza.

El examen del contenido estomacal de algunas orcas revela que esporádicamente devoran algún calderón. Pero se sabe que estos acuden en masa para ahuyentar a sus enemigas, un comportamiento que solo se conoce en este cetáceo, que planta cara así al superdepredador.

La imitación vocal podría ser otra táctica defensiva: «Una hipótesis es que con tales sonidos no serían reconocidas como presas», explica Erbe. Los calderones oportunistas y carroñeros que siguen a las orcas para devorar los restos de sus cacerías podrían pasar inadvertidos si emplean llamadas similares. «Todo esto sucede bajo el agua, donde la luz se propaga muy mal. Así que los cetáceos dependen del sonido para localizar a sus presas y enemigos y como medio de orientación», aclara. El calderón común es capaz de distinguir vocalizaciones de la orca con distintos significados. Curé plantea la posibilidad de que, en lugar de engañar a sus rivales, los individuos que los emiten quieran enseñar a los demás miembros de la manada un nuevo sonido de orca.

Las nuevas investigaciones confirmarán si la imitación es real. Los científicos podrían cotejar sus datos de escucha con observaciones directas de las interacciones de los animales en su medio, o incluso reproducir sonidos de orca y observar la reacción de los calderones.

Ahora bien, recurrir a los sonidos de depredación en un futuro experimento exigirá sumo cuidado. «La reacción ante un depredador puede ser muy drástica. En algunas zonas protegidas está prohibido emitir más dos grabaciones de amenaza al año», explica Curé.

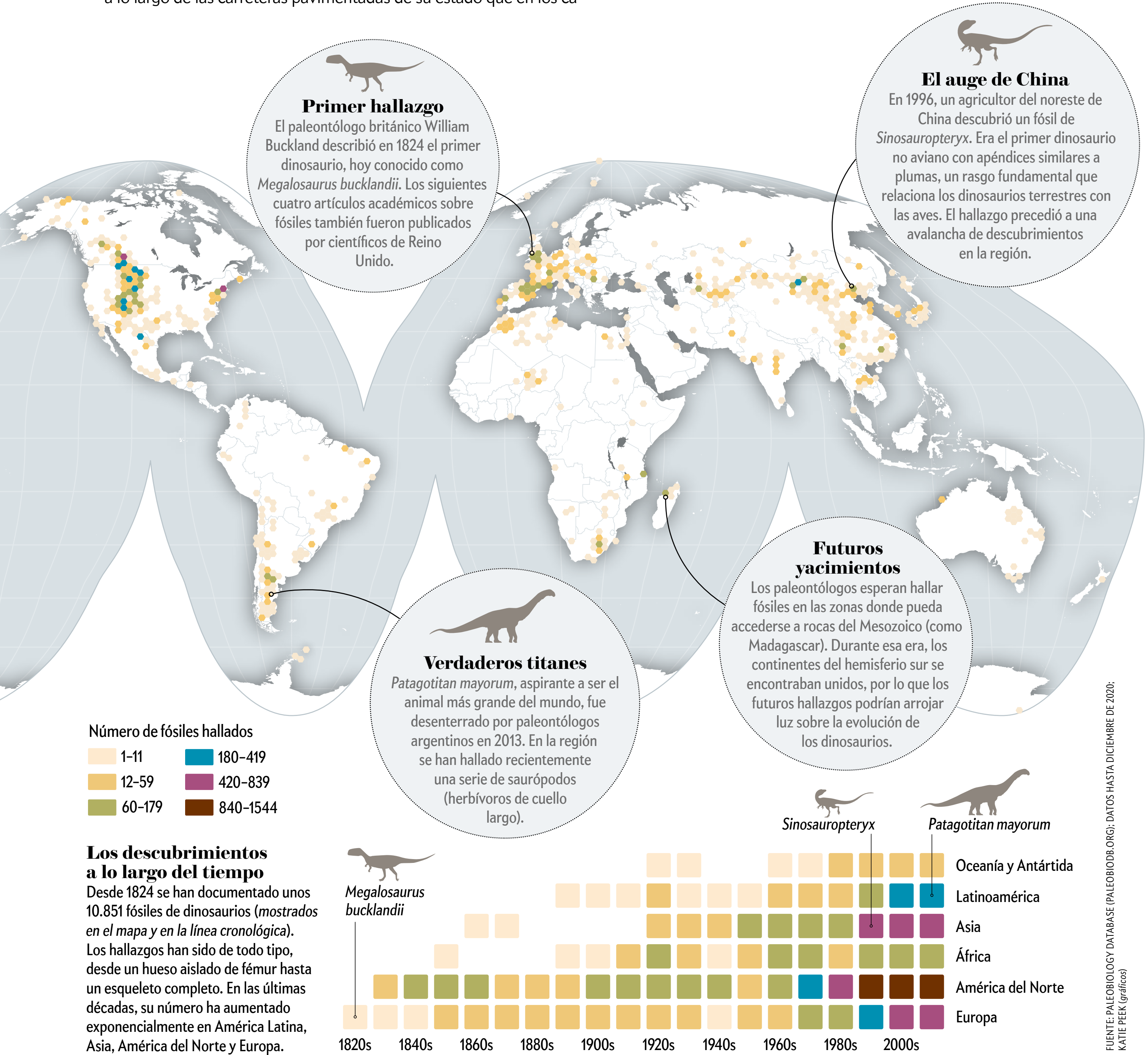
—Doris Elín Urrutia

PALEONTOLOGÍA

¿Dónde se han encontrado dinosaurios?

Los hallazgos no paran de crecer, y todavía quedan muchos fósiles por descubrir

Durante los dos siglos transcurridos desde la identificación de los primeros huesos en Inglaterra, se han desenterrado casi 11.000 fósiles de dinosaurios en todo el mundo, dos tercios de ellos en América del Norte y en Europa. La mayoría de los descubrimientos han tenido lugar en los países de origen de los paleontólogos; la facilidad del acceso para desarrollar el trabajo de campo ha conllevado una concentración de hallazgos en las zonas más transitadas. Samantha Hopkins, de la Universidad de Oregón, señala que hay más excavaciones a lo largo de las carreteras pavimentadas de su estado que en los caminos de tierra. Por otro lado, los hallazgos se han expandido geográficamente, sobre todo en el este de Asia y la región meridional de América del Sur. Para ampliar las posibilidades, deberían crearse grupos locales de expertos, una tarea complicada en el caso de un campo de estudio tan especializado (y no particularmente lucrativo). Pero la inversión podría ser provechosa: los paleontólogos han identificado unas 1000 especies de dinosaurios y estiman que, como mínimo, quedan otras tantas por descubrir. *—Katie Peek*



AVIACIÓN

Vuelos conjuntos

Los aviones podrían ahorrar combustible volando en formación, como las aves

De aquí a poco, los aviones comerciales podrían comenzar a volar en tándem, con un aparato siguiendo de cerca al otro para ganar sustentación. La compañía Airbus asegura que esa estrategia, que ha bautizado como Fello'fly, podría hacer que el avión que va detrás ahorre hasta un 10 por ciento de combustible.

La idea se inspira en el comportamiento de aves migratorias como los gansos, que vuelan en formación para ahorrar energía. Al igual que un pájaro, un avión en movimiento deja tras de sí una estela de aire perturbado, como resultado de los vórtices que generan sus alas. Esos remolinos giran hacia fuera conforme se disipan y crean una corriente ascendente alrededor de la estela, la cual puede brindar sustentación adicional a un segundo avión que vuele a una determinada distancia del primero y ligeramente desplazado respecto al centro de la estela.

Como resultado, el avión «perseguidor» no precisa tanto impulso del motor, con lo que disminuyen el consumo de combustible y las emisiones. Pero los aparatos han de posicionarse de manera precisa: si el segundo avión se acerca demasiado al centro de la estela, los remolinos lo empujarán hacia abajo en vez de elevarlo. Y también tendrán que volar mucho más cerca, pasando de los 55 kilómetros de separación habituales en el espacio aéreo oceánico a tan solo 3.

El verano pasado, Airbus realizó tres pruebas de esta técnica. Dos aviones A350 sobrevolaron el océano Atlántico al oeste de Francia, permaneciendo a 3 kilómetros el uno del otro durante cuatro horas. «Esas pruebas demostraron que es posible estabilizar la aeronave en la corriente ascendente de la estela usando el piloto automático, y que el ahorro de combustible es considerable», explica Nick Macdonald, ingeniero de Airbus y director del proyecto Fello'fly.

Airbus pretende usar este tipo de vuelos con aparatos compatibles de diversas aerolíneas que surquen a la vez el mismo espacio aéreo. La compañía ya ha firmado acuerdos con dos aerolíneas para la siguiente fase de pruebas, prevista para este año, y varios gestores internacionales de navegación aérea también planean participar.

Los aviones implicados deben coordinarse de manera muy precisa desde que aún están en tierra, a fin de evitar accidentes y turbulencias excesivas. El piloto comercial David Mrak, ajeno al proyecto, señala algunos retos que habrá que afrontar: establecer reglas para los dos aparatos, determinar el papel de los controladores aéreos, mantener la comunicación, prever situaciones de emergencia y condiciones meteorológicas adversas... y repartir los beneficios. «Por ejemplo», ilustra, «cuando el vuelo en tándem lo realicen aviones de dos compañías distintas, ¿quién ahorrará el combustible?».

La Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea (Eurocontrol), socia del proyecto, codificará los requisitos y procedimientos previos al despegue. La responsabilidad de mantener la separación entre dos aviones que vuelan a la misma altitud recae en gran medida sobre los controladores aéreos, apunta Giovanni Lenti, directivo de Eurocontrol. Pero dada la proximidad que requiere Fello'fly, añade, «tendrán que encargarse de ello los propios pilotos, mediante sistemas de a bordo que se incorporarán a la aviónica de los aparatos».

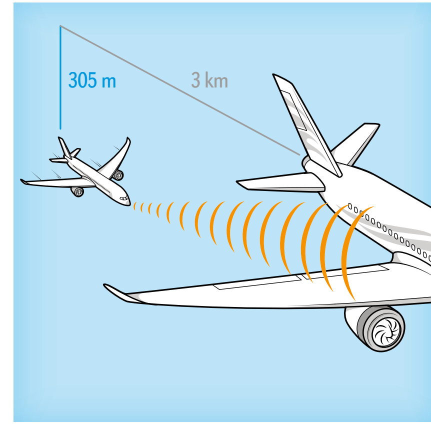
Aunque una separación tan pequeña pueda parecer peligrosa, Mrak opina que es posible volar en esas condiciones. «Los pilotos recibimos una preparación exhaustiva», afirma. «Volar en formación solo requiere un entrenamiento y un protocolo adecuados.» Como medida de precaución, subraya Lenti, los controladores aéreos reservarían una trayectoria de vuelo despejada a unos 305 metros por debajo de ambos aviones, por si uno de ellos tuviera algún problema.

Airbus espera desplegar el programa Fello'fly en vuelos comerciales hacia el año 2025, y Lenti aclara que al principio se centrarán en las rutas oceánicas, para evitar las zonas con más tráfico aéreo.

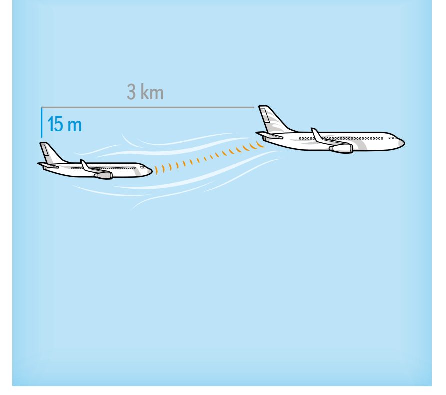
—Dhananjay Khadilkar



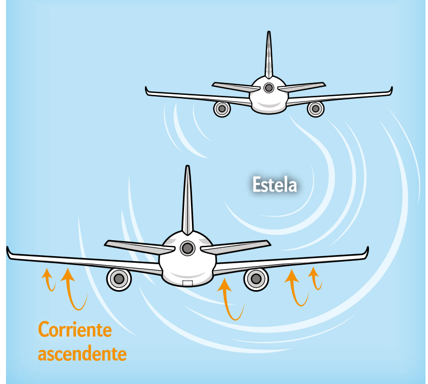
1 Un programa informático analiza los planes de vuelo y elige los dos aviones que se emparejarán. Estos despegan desde puntos distintos y adoptan la misma trayectoria, guiados por los controladores aéreos.



2 Los pilotos activan un sistema de a bordo para lograr que los aviones vuelen separados por tan solo 3 kilómetros, a la vez que mantienen una distancia vertical de 305 metros.



3 El segundo avión se mueve hasta situarse 15 metros por debajo de su compañero y ligeramente desplazado respecto al centro de la estela.



4 La corriente ascendente que genera el primer avión brinda sustentación a su perseguidor, permitiendo que ahorre energía y combustible.

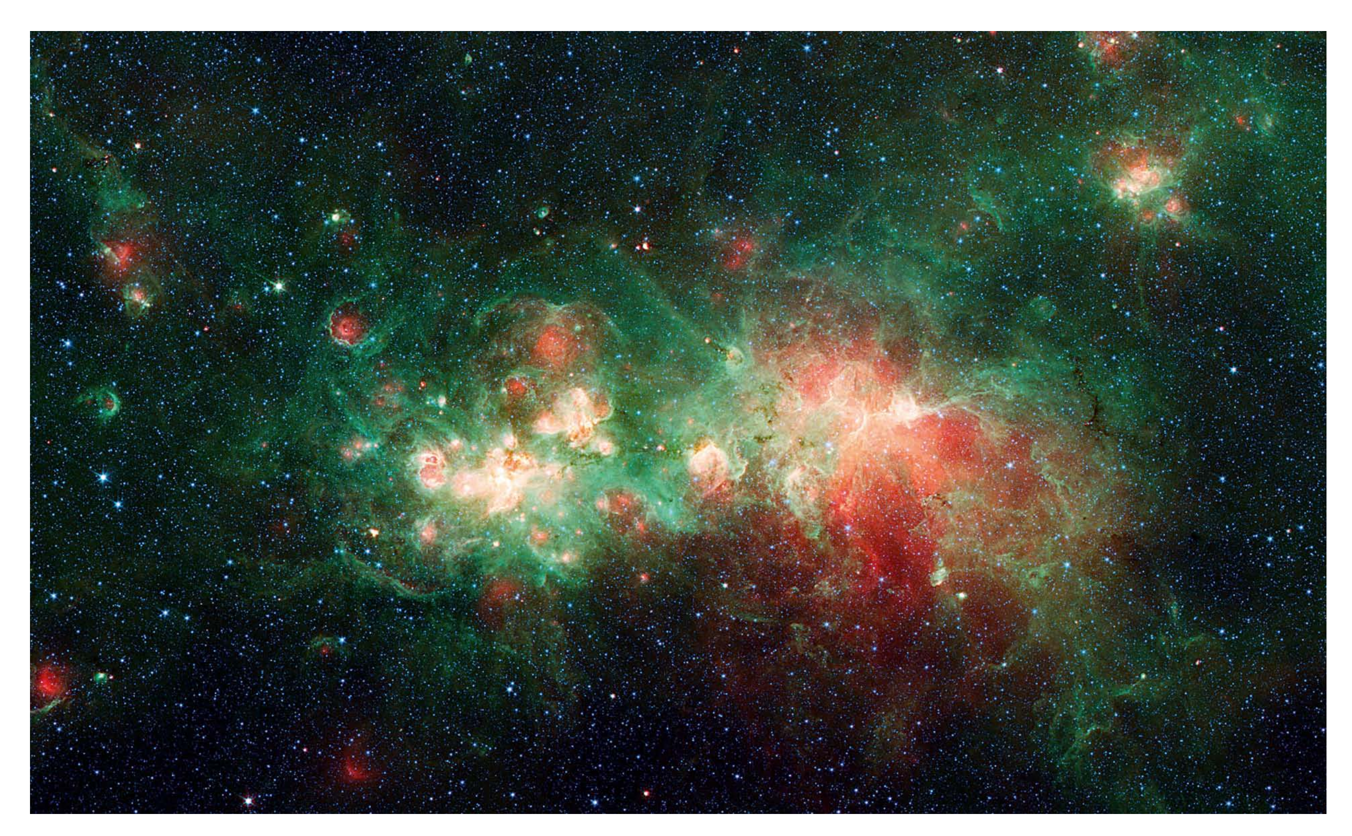
FUENTE: AIRBUS; BROWN BIRD DESIGN *(ilustración)*

ASTROQUÍMICA

De las nubes interestelares al mundo de ARN

La detección en el espacio de un compuesto clave para la formación del ARN apoya la idea de que la vida en la Tierra pudo surgir a partir de estos ácidos nucleicos

VÍCTOR MANUEL RIVILLA RODRÍGUEZ



NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL)/INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA

LAS REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (*en la imagen, la nebulosa W51, situada a 17.000 años luz de la Tierra*) **contienen la materia prima a partir de la cual se forman los planetas. El estudio de sus propiedades químicas promete ayudar a entender el origen de la biología terrestre y la viabilidad de la vida en otras partes de la galaxia.**

La vida en la Tierra se originó hace unos 3800 millones de años. Sin embargo, todavía no conocemos con exactitud los procesos que lo permitieron. Tal y como la conocemos, la biología se basa en tres piezas fundamentales: al ADN, el ARN y las proteínas. Entender cómo se formaron estas moléculas y en qué orden lo hicieron constituye una de las cuestiones clave para desentrañar el enigma del origen de la vida. Sin embargo, la misión no resulta nada sencilla, ya que aquí se nos plantea un problema parecido al de la gallina y el huevo. El ADN, que contiene la información genética, necesita la capacidad catalítica de las proteínas para poder replicarse. Pero, a su vez, la síntesis de proteínas requiere la información genética codificada en el ADN. Así pues, ¿qué fue antes, el ADN o las proteínas?

Para resolver la cuestión, hacia los años sesenta del pasado siglo se propuso la idea de que la vida en nuestro planeta pudo surgir a partir del denominado «mundo de ARN»: una hipotética fase inicial en la que habrían sido estas moléculas las que, de manera simultánea, se encargaron de realizar las tareas que hoy llevan a cabo el ADN y las proteínas. Por tanto, si queremos entender cómo comenzó la vida, una vía prometedora pasa por estudiar la formación de moléculas de ARN durante las primeras fases de nuestro planeta.

En sus inicios, la hipótesis del mundo de ARN se encontró con algunos escollos, ya que no parecía nada sencillo que los ribonucleótidos (las piezas básicas del ARN, compuestas por un ribonucleósido y un grupo fosfato) pudieran formarse en las condiciones que reinaban en la Tierra primigenia. No obstante, esa situación ha cambiado en los últimos años. Desde 2009, varios experimentos de química prebiótica han demostrado que las

primeras moléculas de ARN pudieron formarse a partir de otras mucho más simples, constituidas por tan solo unos pocos átomos.

Llegados aquí, la química prebiótica y la astrofísica se dan la mano. Ello se debe a que cabe la posibilidad de que esas moléculas relativamente sencillas, las precursoras del mundo de ARN, tuvieran un origen extraterrestre. En un trabajo publicado en *The Astrophysical Journal Letters*, nuestro grupo del Centro de Astrobiología de Madrid ha dado un paso importante en esta dirección al confirmar, por primera vez, la presencia en el espacio de hidroxilamina (NH_2OH), uno de los precursores básicos del ARN.

Astroquímica prebiótica

Nuestro planeta, junto con todo el sistema solar, se formó a partir del colapso gravitatorio de una gran nube de gas y polvo. Gracias a las investigaciones realizadas en las últimas décadas en el campo de la astroquímica, hoy sabemos que el entorno natal de las estrellas se encuentra repleto de moléculas. Este rico maná químico, disponible en la cuna de nuestro sistema solar, pudo transmitirse a la joven Tierra durante su proceso de formación. Por ello, los astrofísicos estamos muy interesados en saber si los procesos químicos que tienen lugar en las nubes interestelares son capaces de generar las moléculas básicas que pudieron desencadenar el mundo de ARN y, con ello, la aparición de los primeros organismos en nuestro planeta.

En un artículo publicado en 2019 en la revista *Science*, un grupo liderado por Thomas Carell, de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich, demostró que era

LADRILLOS DE ARN EN EL CORAZÓN DE LA VÍA LÁCTEA

EN CONTRA DE LO QUE SE PENSABA hasta hace unos años, varios experimentos recientes han demostrado que los ribonucleósidos, una de las piezas básicas del ARN, pueden formarse a partir de moléculas simples en condiciones prebióticas. Una de las posibles rutas de síntesis se muestra en el esquema inferior. Hasta ahora, varias moléculas clave (*amarillo*) se habían detectado en el medio interestelar, pero faltaba por encontrar uno de los precursores de la reacción: la hidroxilamina.

Un trabajo realizado por un grupo interdisciplinar del Centro de Astrobiología de Madrid ha conseguido identificar esta molécula en la nube molecular G+0.693-0.027, situada cerca del centro de la galaxia. Dado que las estrellas y los planetas se forman a partir del colapso gravitatorio de estas estructuras, el resultado apoya la hipótesis del «mundo de ARN»: la idea de que la vida en la Tierra pudo haberse originado a partir de este tipo de ácidos nucleicos.

VÍCTOR MANUEL RIVILLA ET AL./CENTRO DE ASTROBIOLOGÍA DE MADRID (*moléculas*); NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL)/INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA/S. STOLOVY/TELESCOPIO SPITZER (*centro de la galaxia*)

posible formar ribonucleósidos de ARN en condiciones prebióticas a partir de moléculas relativamente pequeñas.

Una de las rutas de formación propuesta por estos investigadores se inicia con dos compuestos muy simples: el cianoacetileno (HC_3N) y la hidroxilamina (NH_2OH). Del primero se conoce su existencia en el medio interestelar desde hace décadas. Sin embargo, el segundo había resultado extremadamente esquivo. Ninguna de las numerosas búsquedas efectuadas durante los últimos años había sido capaz de detectarlo en el medio interestelar.

Para abordar la cuestión, nuestro grupo decidió buscar hidroxilamina en la nube molecular conocida como G+0.693-0.027. Elegimos este lugar, situado cerca del centro de la Vía Láctea, ya que otros trabajos previos de nuestro equipo habían revelado que presenta una química muy rica, especialmente en compuestos con nitrógeno. Así pues, G+0.693-0.027 parecía un candidato idóneo para encontrar en el medio interestelar este precursor clave del mundo de ARN.

Para nuestras observaciones empleamos el radiotelescopio que el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM, una colaboración francesa, alemana y española) tiene instalado en Sierra Nevada, en la provincia de Granada. Esta enorme antena, de 30 metros de diámetro, puede detectar los fotones que emiten las moléculas presentes en el medio interestelar cuando giran sobre sí mismas. Cada molécula produce una señal con unas frecuencias determinadas, lo que genera un patrón característico que permite identificarla de manera unívoca.

Al apuntar el telescopio a la nube molecular G+0.693-0.027 y sintonizar las frecuencias asociadas a la hidroxilamina, logramos confirmar por primera vez la presencia de esta molécula en el espacio.

¿Cuán complejo es el medio interestelar?

Nuestros resultados han confirmado que los procesos químicos del medio interestelar son capaces de producir uno de los ingredientes fundamentales para el mundo de ARN. Y es posible que las especies moleculares que vemos en G+0.693-0.027 formaran también parte de la nube de gas a partir de la cual nació nuestro sistema planetario. En tal caso, la Tierra pudo haber recibido esa herencia química tanto durante su proceso de formación como en las etapas posteriores, como consecuencia del impacto de asteroides y cometas. Una vez en la superficie de la joven Tierra, estas moléculas de origen extraterrestre habrían contribuido al gran salto que permitió el origen de la vida: el que va de la química prebiótica a la biología.

Desde el punto de vista de la astroquímica, nuestro resultado ayuda a entender cuál pudo ser la contribución interestelar al cóctel prebiótico. La gran pregunta que aspiramos a responder en los próximos años es hasta dónde puede llegar la complejidad química en el medio interestelar. Ahora sabemos que los precursores iniciales del ARN pueden producirse en el espacio. Sin embargo, para llegar a la formación de los ribonucleósidos hace falta la participación de moléculas aún más complejas. ¿Puede la química interestelar sintetizar todas las moléculas necesarias para dar lugar al mundo de ARN?

Hasta hoy hemos detectado más de doscientas especies moleculares en el medio interestelar. El apasionante desafío que tenemos por delante consiste en identificar moléculas con un nivel creciente de complejidad química; es decir, con un mayor número de átomos. Sin embargo, esto complica su detección. Cuanto más compleja es una molécula, menor resulta su abundancia en el medio interestelar y más débil es la señal que emite. Por tanto, para detectar la presencia de moléculas cada vez mayores, tendremos que sacar el máximo partido a los telescopios disponibles en la actualidad.

Con todo, es probable que ello no baste y que sea necesario esperar a la próxima generación de radiotelescopios. Varios de ellos están ya en fase de construcción o de diseño, como el Conjunto Telescópico del Kilómetro Cuadrado (SKA, por sus siglas en inglés), proyectado en Australia y Sudáfrica, o el Conjunto Muy Grande de Próxima Generación (ngVLA), en Estados Unidos. Estas instalaciones nos permitirán hacer descubrimientos que hoy por hoy son solo sueños.

Entender cuán compleja puede ser la química de las regiones donde se están formando o donde se formarán nuevas estrellas y planetas encierra implicaciones profundas no solo para el origen de la vida en la Tierra, sino también para su aparición en otros lugares del universo. Si confirmamos que las moléculas básicas para el mundo de ARN se encuentran diseminadas por toda la galaxia y que su abundancia es lo suficientemente elevada, ello implicaría que las nubes de gas que han originado los miles de sistemas planetarios conocidos hasta la fecha contenían en su seno el material químico necesario para alumbrar la vida. De ser así, se abrirá de par en par la puerta hacia un universo en el que no estemos solos.

Víctor Manuel Rivilla Rodríguez
es investigador en el Centro de Astrobiología de Madrid (CSIC e Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial).

PARA SABER MÁS

Unified prebiotically plausible synthesis of pyrimidine and purine RNA ribonucleotides. Sidney Becker et al. en *Science*, vol. 366, págs. 76-82, octubre de 2019.
Toward the RNA-world in the interstellar medium: Detection of urea and search of 2-amino-oxazole and simple sugars. Izaskun Jiménez-Serra et al. en *Astrobiology*, vol. 20, págs. 1048-1066, abril de 2020.
Prebiotic precursors of the primordial RNA world in space: Detection of NH_2OH. Víctor M. Rivilla et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 899, art. L28, agosto de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la vida. Alonso Ricardo y Jack W. Szostak en *IyC*, noviembre de 2009.
El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida. Rafael Bachiller en *IyC*, abril de 2015.

BIOLOGÍA CELULAR

Desarrollan un sensor para medir la temperatura intracelular

El instrumento detecta los misteriosos picos de temperatura que se producen en determinados lugares de la célula

ALLA KATSNELSON



GETTY IMAGES/WIR0MAN/ISTOCK

SE HAN ENCONTRADO variaciones térmicas extrañas dentro de las células; por ejemplo, una temperatura particularmente alta en las mitocondrias (*azul oscuro*), las fábricas de energía de la célula.

Tomar la temperatura de una persona es tarea fácil: se coloca un termómetro bajo la lengua y se espera a que alcance un valor alrededor de los 37 °C. Esta única medida integra el calor generado por los aproximadamente 30 billones de células del cuerpo humano. La difusión del calor establece la temperatura corporal, a la que los diferentes tipos de células contribuyen en distinta medida.

Para conocer de verdad cómo se regula la temperatura corporal en los seres vivos hay que fijarse en cada célula. Pero a pesar de que en la última década se ha mejorado tremendamente la capacidad para observar de cerca las interacciones moleculares, los científicos han tenido que afanarse en desarrollar instrumentos que midan con exactitud las propiedades térmicas de una célula desde el interior.

Un nuevo estudio acaba de subsanar esta importante deficiencia. Por primera vez se ha medido dentro de las células humanas la conductividad térmica, esto es, la velocidad a la que transfieren el calor. En un artículo publicado en *Science Advances*, se utilizaron sensores diamantinos diminutos que liberan calor a la vez que lo miden para demostrar que se disipa en las células mucho más lentamente de lo esperado. Para Madoka Suzuki, biofísico de la Universidad de Osaka y coautor del artículo, «fue muy sorprendente para nosotros y para otros de nuestro campo». Dado que el líquido intracelular es mayoritariamente agua, siempre se había dado por hecho que transmitía el calor como el agua, pero resulta que lo hace unas cinco veces más lento, como si se estuviera disipando en aceite. Suzuki comenta que, hasta ahora, «nadie conocía esta propiedad básica de las células vivas, sin cuya valoración no podíamos modelizar los cambios de la temperatura celular».

Según el físico de la Universidad Harvard Mikhail Lukin, que ha desarrollado sensores para explorar la temperatura intracelular pero que no trabajó en este proyecto, «son unos resultados fascinantes que hay que conocer mejor. Si se confirman, sería bastante trascendente».

Estos hallazgos ayudarían a resolver un gran misterio sobre la temperatura celular que ha desconcertado a los biólogos: la existencia de picos térmicos hiperlocalizados. Se han descrito diferencias transitorias de algunos grados Celsius de un punto a otro dentro de una célula, un espacio cuyo diámetro oscila entre 5 y 120 micrómetros en los humanos (entre el tamaño de las heces de un ácaro del polvo y el del propio ácaro). Un estudio de 2018 incluso defendió que las mitocondrias, bombas energéticas intracelulares con forma de comprimido, funcionan a unos achicharrantes 50 °C.

La idea de que las células puedan albergar gradientes de temperatura tan notables resulta sorprendente porque, en

un espacio tan minúsculo, un incremento térmico abrupto debería disiparse bastante rápido. Pero los resultados han sido contundentes, comenta Luís Carlos, nanocientífico de la Universidad de Aveiro, que estudia la termometría intracelular pero que no participó en el nuevo estudio. «Creo que los resultados experimentales de los últimos cinco años apuntan sin duda a la existencia de fluctuaciones térmicas intracelulares.»

En el nuevo trabajo, Suzuki y su equipo se basaron en la novedosa técnica de Lukin para crear un sensor de fluorescencia con nanodiamantes sobre un polímero liberador de calor. Los cambios de temperatura locales expanden muy ligeramente las imperfecciones del nanodiamante, lo que altera su fluorescencia cuando un láser incide sobre él. Según Lukin, este método es mucho más estable que otros tipos de sondas porque los diamantes son muy inertes.

Suzuki afirma que la conductividad térmica identificada en el nuevo trabajo explicaría los pequeños picos de 1 °C, aunque no la enorme oleada calorífica de las mitocondrias. También propone que quizás actúen como un sistema de señalización intracelular desconocido hasta ahora. Por ejemplo, un pulso de calor podría decir a las proteínas que se plieguen o se desplieguen, que realicen ciertas reacciones enzimáticas, o repercutir en los canales que regulan la concentración del calcio en los músculos.

Suzuki y Lukin coinciden en que todavía queda mucho por investigar para saber si estos gradientes existen realmente y cómo surgen. Para Lukin, «este sorprendente problema nos genera mucha confusión y tenemos que resolverlo. Lo más novedoso es que contamos con esta nueva herramienta para responder dicha cuestión biológica».

__Alla Katsnelson,__ doctora en neurociencia por la Universidad de Oxford, escribe sobre ciencia en varios medios. Cubre temas de biología, salud y medicina, tecnología y política científica.

PARA SABER MÁS

In situ measurements of intracellular thermal conductivity using heater-thermometer hybrid diamond nanosensors». Shingo Sotoma et al. en *Science Advances*, vol. 7, eabd7888, enero de 2021.

SISTEMA SOLAR

La presencia de fosfano en Venus, cuestionada de nuevo

Dos estudios vuelven a poner en entredicho la polémica detección del gas en la atmósfera del planeta

ALEXANDRA WITZE

Dos recientes artículos han asestado un nuevo golpe a la idea de que la atmósfera de Venus podría contener fosfano, un gas que se considera un posible signo de vida.

El anuncio de la existencia de fosfano en Venus sacudió la ciencia planetaria el pasado mes de septiembre, cuando un grupo de investigadores comunicó que había identificado la firma espectral del gas en algunos datos telescópicos. De confirmarse el descubrimiento, eso podría implicar (aunque en realidad se trataría de una posibilidad remota) que las nubes de Venus albergan microorganismos que liberan el gas. Desde entonces, varios estudios han puesto en duda la detección, aunque sin llegar a descartarla por completo.

Ahora, un equipo de científicos ha publicado las críticas más contundentes realizadas hasta la fecha. «Lo que aportamos es una mirada global, otra manera de explicar estos datos sin recurrir al fosfano», señala Victoria Meadows, astrobióloga de la Universidad de Washington en Seattle que ayudó a dirigir los últimos estudios. Ambos trabajos aparecieron a finales de enero en el repositorio arXiv y ya han sido aceptados para su publicación en *The Astrophysical Journal Letters*.

Explicaciones alternativas

En un estudio, Meadows y sus colaboradores analizaron los datos de uno de los telescopios que sirvieron para descubrir el fosfano, y no lograron detectar la firma espectral del gas. En el otro, los científicos calcularon cómo se comportarían los gases en la atmósfera de Venus y concluyeron que lo que el equipo original tomó por fosfano es en realidad dióxido de azufre (SO_2), un gas común en Venus y que no guarda relación con la vida.

Los últimos artículos muestran de manera muy clara que no hay señales del gas, afirma Ignas Snellen, astrónomo de la Universidad de Leiden que ha publicado otra crítica distinta al artículo original. «Eso hace que todo el debate sobre el fosfano, y posiblemente sobre la vida en la atmósfera de Venus, se torne bastante irrelevante.»

Jane Greaves, astrónoma de la Universidad de Cardiff y líder del equipo que anunció la detección del fosfano, apunta que ella y sus colaboradores aún están estudiando los nuevos artículos y que no harán comentarios hasta haberlos evaluado.

La presencia o ausencia de fosfano en Venus no es un tema baladí. En la Tierra, el gas (formado por un átomo de fósforo y tres de hidrógeno, PH_3) puede proceder de fuentes industriales como los pesticidas, o biológicas como los microbios. Cuando anunciaron su hallazgo, Greaves y sus colaboradores contemplaron la posibilidad de que la presencia de fosfano estuviera relacionada con la existencia de vida en Venus, a falta de otra manera evidente de explicarla.

Pero la detección del fosfano se basa en una cadena de observaciones e inferencias que otros científicos han ido socavando en los últimos meses.

La historia de una polémica

El equipo de Greaves usó el telescopio James Clerk Maxwell (JCMT) de Hawái

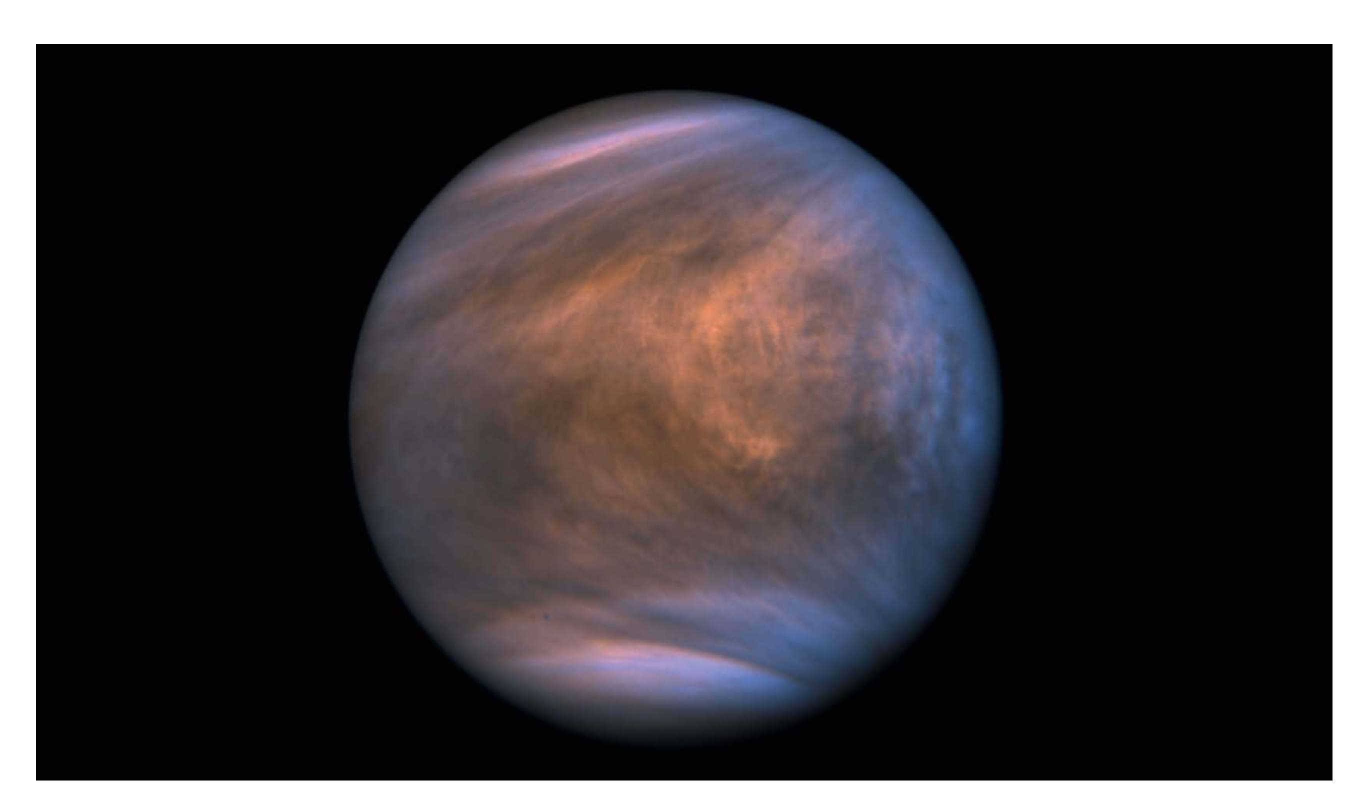


IMAGEN DE LAS NUBES DE VENUS, captada en el ultravioleta por el orbitador japonés Akatsuki.

ISAS, JAXA, AKATSUKI; MELI THEV (*PROCESAMIENTO*)

y observó una línea espectral en la atmósfera de Venus a una frecuencia de 266,94 gigahercios, un valor en torno al cual tanto el fosfano como el SO_2 absorben la luz. Los científicos confirmaron la existencia de la línea empleando el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA), en Chile. Además, buscaron con ALMA otras líneas espectrales que cabría esperar si la línea procediera del SO_2, pero no las encontraron. Eso, afirmaron, sugería que la línea que habían visto a 266,94 gigahercios provenía del fosfano.

Pero resultó que ALMA había procesado de manera incorrecta los datos que emplearon los investigadores. Cuando comenzó el debate sobre el fosfano en Venus, los responsables de ALMA se dieron cuenta del error, retiraron los datos, los volvieron a procesar y los publicaron de nuevo en noviembre. Greaves y sus colaboradores analizaron los datos reprocesados y determinaron que seguían observando fosfano, aunque mucho menos del que habían anunciado en un principio.

Esos datos reprocesados de ALMA constituyen la base de uno de los nuevos estudios que cuestionan la existencia de fosfano. Un equipo en el que participaba Meadows y dirigido por Alex Akins, tecnólogo que investiga en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA en California, se propuso reproducir el trabajo del grupo de Greaves y analizó los datos reprocesados. Sin embargo, estos investigadores no observaron la línea espectral del fosfano. «El caso es que no logramos verla», incide Akins.

Es la primera vez que un equipo independiente publica un análisis de los datos reprocesados de ALMA.

El segundo trabajo explora la línea de 266,94 gigahercios detectada con el JCMT. Un equipo liderado por Andrew Lincowski, astrónomo de la Universidad de Washington, y en el que también estaban Meadows y Akins modelizó la estructura de la atmósfera de Venus a distintas alturas. Hallaron que la mejor manera de explicar la observación del JCMT era suponer la existencia de SO_2 a más de 80 kilómetros sobre la superficie del planeta, y no la de fosfano a 50 o 60 kilómetros por encima del suelo, como concluyó el equipo de Greaves.

Con todo, el caso aún no está cerrado. Los nuevos estudios presentan argumentos en contra de la presencia de fosfano, pero no la descartan por completo. «Sigue habiendo suficiente margen de maniobra», admite Meadows.

En última instancia, para zanjar el debate harán falta nuevas observaciones de Venus, muchas de las cuales tendrán lugar en los próximos meses y años, señala Akins. «Hasta que no veamos algo nuevo, probablemente continuaremos dándole vueltas.»

Alexandra Witze *es periodista científica especializada en ciencias de la Tierra y del espacio.*

Artículo original publicado en *Nature News*, 28 de enero de 2021. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2021

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Complications in the ALMA detection of phosphine at Venus. Alex B. Akins et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 907, n.º 2, art. L27, 27 de enero de 2021.

Claimed detection of PH_3 in the clouds of Venus is consistent with mesospheric SO_2. Andrew P. Lincowski et al. en arXiv:2101.09837 [astro-ph.EP], 25 de enero de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

El exoplaneta vecino. M. Darby Dyar, Suzanne E. Smrekar y Stephen R. Kane en *IyC*, abril de 2019.

La transformación de Venus. Shannon Hell en *IyC*, agosto de 2020.



PALEONTOLOGÍA

EL AUTÉNTICO *DILOPHOSAURUS*

El estudio más completo realizado sobre uno de los dinosaurios más icónicos de *Parque Jurásico* nos muestra una imagen muy diferente de la que ofrecía la película

Matthew A. Brown y Adam Marsh

Ilustración de Chase Stone



EN SÍNTESIS

Uno de los dinosaurios más famosos de *Parque Jurásico*, el *Dilophosaurus*, se representó en la película como un depredador de tamaño pequeño con dos crestas en la cabeza, unas mandíbulas débiles y una membrana desplegable en el cuello. Esa imagen se basaba en parte en las pruebas paleontológicas de las que se disponía hace tres décadas.

Sin embargo, desde entonces esa visión ha cambiado notablemente gracias al descubrimiento de fósiles más completos y a los avances en los métodos de estudio paleontológicos y geológicos.

Las nuevas pruebas indican que su tamaño era mucho mayor de lo que se pensaba, y que tenía un cuerpo robusto y unas mandíbulas poderosas, rasgos que lo convertirían en el mayor depredador de su hábitat.

Matthew A. Brown es director de la Colección Paleontológica de Vertebrados de Texas y profesor de métodos de laboratorio y museología aplicados a la paleontología en la Universidad de Texas en Austin. Investiga las prácticas de conservación en los museos y su efecto en los fósiles como fuente de información científica.



Adam D. Marsh es paleontólogo principal del Parque Nacional del Bosque Petrificado, en Arizona, e investigador asociado de la Colección Paleontológica de Vertebrados de Texas y del Museo del Norte de Arizona. Integra métodos de paleontología, estratigrafía y geocronología para estudiar los vertebrados del Mesozoico inicial.



L SOL DEL ATARDECER AZOTABA NUESTRA ESPALDA DESPUÉS DE HABER TRABAjado ya un largo día en el campo. Agotados, retirábamos arena con la ayuda de palas e incluso con nuestras propias manos. Nos hallábamos en el corazón del país de los dinosaurios, en la meseta del Colorado en el norte de Arizona y en medio de la Nación Navajo. Nos habíamos desplazado al lugar para determinar la antigüedad de dos esqueletos de *Dilophosaurus wetherilli* descubiertos allí hacía tiempo. Ese caluroso día de junio de 2014 habíamos estado subiendo y bajando por las tierras baldías para medir los lechos de rocas y llenar la mochila con muestras geológicas. Pero en ese momento no estábamos desenterrando un nuevo dinosaurio, sino nuestra camioneta, que se había atascado en las dunas de arena y estaba hundida hasta los ejes. En lugar de la imagen de gran aventurero de las películas, la vida de campo de un científico trotamundos conlleva numerosas tareas mundanas: solicitar permisos, tomar notas, cocinar y lavar platos en el campamento, revisar los datos del día a la luz de una fogata. Nunca vemos a Indiana Jones o a Alan Grant desenterrando una camioneta atascada.

En verano de 1993, los dinosaurios y la paleontología irrumpieron en las pantallas de cine de todo el mundo. Adaptada a partir de la novela de Michael Crichton de 1990, la película *Parque Jurásico* hizo famosas (y también villanas) a varias especies de dinosaurios poco conocidas hasta entonces. Nombres como *Velociraptor* y *Dilophosaurus* se unieron a *Tyrannosaurus* y *Triceratops* en el lenguaje popular. Pero los dinosaurios de las películas de acción suelen ser diferentes de los animales que los científicos conocen a través de sus restos. Sin embargo, uno de los elementos que contribuyeron al éxito de la franquicia de *Parque Jurásico* (batió récords de taquilla en 1993 y ha vuelto a encabezar las listas en verano de 2020) fue que su narrativa incorporaba los últimos conocimientos de la paleontología y la genética. Por primera vez, Crichton y el director Steven Spielberg ofrecieron al público una imagen moderna del estudio de los dinosaurios, y su retrato como animales activos e inteligentes todavía hoy tiene repercusión.

Por supuesto, Crichton y Spielberg se tomaron algunas libertades artísticas para contar una historia convincente que dramatizaba no solo a los científicos, sino también a los dinosaurios. El animal que más se apartó de las pruebas fósiles era *Dilophosaurus*. En la película se representa como un animal del tamaño de un *golden retriever* con una membrana desplegable en el cuello y una saliva venenosa que mata a Dennis Nedry, el programador informático convertido en contrabandista de embriones de dinosaurio. Pero ¿qué aspecto tenía en realidad *Dilophosaurus*?

De hecho, en el momento en que entró a formar parte de la cultura popular, los científicos no tenían una imagen completa de *Dilophosaurus*. Sin embargo, en las tres décadas transcurridas desde su representación por Hollywood, los investigadores han recuperado fósiles muy completos de él y han analizado sus restos con métodos cada vez más refinados. Como resultado, hoy podemos reconstruir este dinosaurio con mucho detalle: su apariencia y su comportamiento, cómo evolucionó y cómo era el mundo en el que vivió. Estos descubrimientos muestran que el verdadero *Dilophosaurus* se parecía muy poco a su homólogo de la pantalla grande. También nos proporciona la imagen más detallada que se tiene hasta la fecha de un dinosaurio de principios del Jurásico.

HA NACIDO UNA ESTRELLA

Hoy sabemos que *Dilophosaurus* era un dinosaurio bípedo y carnívoro, de más de seis metros de largo, que tenía dos crestas óseas paralelas muy delgadas a lo largo de la parte superior de la cabeza (su nombre, derivado del griego, significa «reptil de dos crestas»). Pero, en 1954, cuando se publicaron los primeros estudios sobre este animal, se le dio un nombre distinto. En una serie de artículos, Samuel Welles, paleontólogo de la Universidad de California en Berkeley, describió dos esqueletos hallados por Jesse Williams, un hombre navajo que vivía cerca de Tuba City, en Arizona. En estos primeros restos, muy fragmentarios, no se distinguían las crestas y Welles denominó al dinosaurio *Megalosaurus wetherilli*, creyendo que pertenecían a una nueva especie

de ese género. Pero cuando en 1964 encontró otro espécimen que conservaba la parte superior del cráneo y mostraba la cresta doble, se dio cuenta de que los primeros fósiles correspondían en realidad a un nuevo género, por lo que propuso denominarlo *Dilophosaurus wetherilli*.

En *Parque Jurásico*, la forma corporal del dinosaurio fue realizada a partir de la descripción anatómica hecha por Welles en 1984 y de las reconstrucciones de los huesos que había en los museos, así como de las ilustraciones del paleontólogo Gregory Paul en el libro *Predatory dinosaurs of the world*, de 1988. Pero el *Dilophosaurus* de la película difería de lo que entonces se sabía de él en algunos aspectos importantes. Uno muy obvio eran sus dimensiones, que eran la mitad de las reales. Los realizadores procedieron así deliberadamente para evitar confusiones con otro dinosaurio antagonista, el *Velociraptor*.

Algunas señas de identidad de la reconstrucción cinematográfica de *Dilophosaurus* eran rasgos ficticios que servían para añadir dramatismo, como la saliva venenosa y las membranas desplegables del cuello. Pero estos adornos eran muy creíbles, ya que recordaban las características biológicas de otros animales reales. Cuando Welles describió los fósiles de *Dilophosaurus*, interpretó que la articulación entre los maxilares en la parte anterior del hocico era débil y sugirió que estos animales quizá fueran carroñeros o mataran a sus presas con las garras. Cuando escribió la novela, Crichton se inventó un mecanismo dramático por el cual los animales escupían un veneno cegador, basándose en cómo lo hacen algunas especies actuales de cobras, que alcanzan hasta los dos metros de distancia. La inspiración para las membranas del cuello o el collar de volantes vino de algunas especies de lagartos agámidos que viven en Australia y Nueva Guinea. Estos lagartos poseen una estructura ósea y cartilaginosa que nace en la garganta y sostiene el collar membranoso desplegable. No obstante, no hay ninguna prueba de este rasgo en los fósiles de *Dilophosaurus*.

Otros aspectos de *Parque Jurásico* sí estaban respaldados por datos científicos. A principios de la década de 1980, se estaba empezando a aceptar de forma generalizada que las aves actuales descienden de los dinosaurios y que son, de hecho, el último linaje superviviente de estos. Los cineastas descartaron las primeras pruebas de animación donde los velocirráptores se desplazaban de forma sinuosa como las serpientes. Siguiendo las recomendaciones de su asesor científico, el paleontólogo Jack Horner, estos animales mostraban movimientos más similares a los de las aves. En lugar de representarlos como seres perezosos parecidos a lagartos, de acuerdo con la imagen que tenían de ellos los eruditos del siglo XIX, en la película aparecían como animales rápidos e inteligentes. Era la primera vez que la mayoría de la población general descubría la conexión entre las aves y los dinosaurios.

RENOVADO Y ACTUALIZADO

Dejando a un lado las licencias artísticas, la visión científica de *Dilophosaurus* iba a cambiar en los años posteriores al lanzamiento de *Parque Jurásico*. A la vez que aparecían el libro y la película, la paleontología estaba atravesando un momento de grandes cambios. Los avances en informática estaban revolucionando el estudio de los fósiles, ya que permitían procesar enormes conjuntos de datos de formas que eran inimaginables en el momento en que se descubrió *Dilophosaurus*. Por ejemplo, el análisis cladístico, que utiliza características anatómicas heredadas y que se pueden comparar entre animales de forma estadística, permite comprobar las hipótesis sobre las relaciones evolutivas entre ellos. Hoy es posible analizar muchas más características de una forma más rápida y, por lo tanto, desarrollar hipótesis más sólidas sobre las relaciones de parentesco entre los dinosaurios y sobre su evolución. El mayor poder de cómputo y el desarrollo en medicina de la tomografía computarizada también proporcionó una forma no destructiva de analizar el interior de los huesos y las rocas y de ver características ocultas de la anatomía.

Pero no solo evolucionaron las herramientas analíticas de las que disponían los paleontólogos. En 1998, los equipos de la Universidad de Texas en Austin comenzaron a recuperar más restos de *Dilophosaurus* en la misma región de Arizona que había proporcionado los primeros hallazgos. Los nuevos fósiles conservaban partes de la anatomía de *Dilophosaurus* que faltaban o estaban distorsionadas en los restos recuperados antes.

La mayoría de las veces, los fósiles se extraen de grandes bloques de roca y se envuelven con yeso para protegerlos durante su traslado hasta el laboratorio. Cuando llegan al museo, los paleontólogos usan tornos dentales, cinceles y pequeños martillos neumáticos de mano para retirar con cuidado la roca y separar los fósiles. Después de millones de años de exposición a procesos geológicos, como el aplastamiento y la meteorización, los fósiles que encontramos suelen estar distorsionados e incompletos. A veces los desmontamos y reconstruimos los fragmentos rotos para aproximarnos mejor a su estado original, al tiempo que esculpimos y agregamos el material faltante basándonos en la información que tenemos de animales estrechamente emparentados con ellos.

Dilophosaurus se ha convertido en el dinosaurio del Jurásico inferior mejor documentado del mundo

Cuando Wann Langston y su equipo prepararon el primer esqueleto de *Dilophosaurus* en la Universidad de California en Berkeley hacia 1950, rellenaron las partes ausentes del cráneo a partir de moldes de cráneo más completos de otro dinosaurio carnívoro del Jurásico, y esculpieron con yeso las partes que faltaban de la pelvis. Pero nadie sabía cómo eran en realidad esas partes anatómicas; las reconstrucciones se basaron en una hipótesis sobre la forma que tendría *Dilophosaurus*, una idea que debía corroborarse con nuevos fósiles.

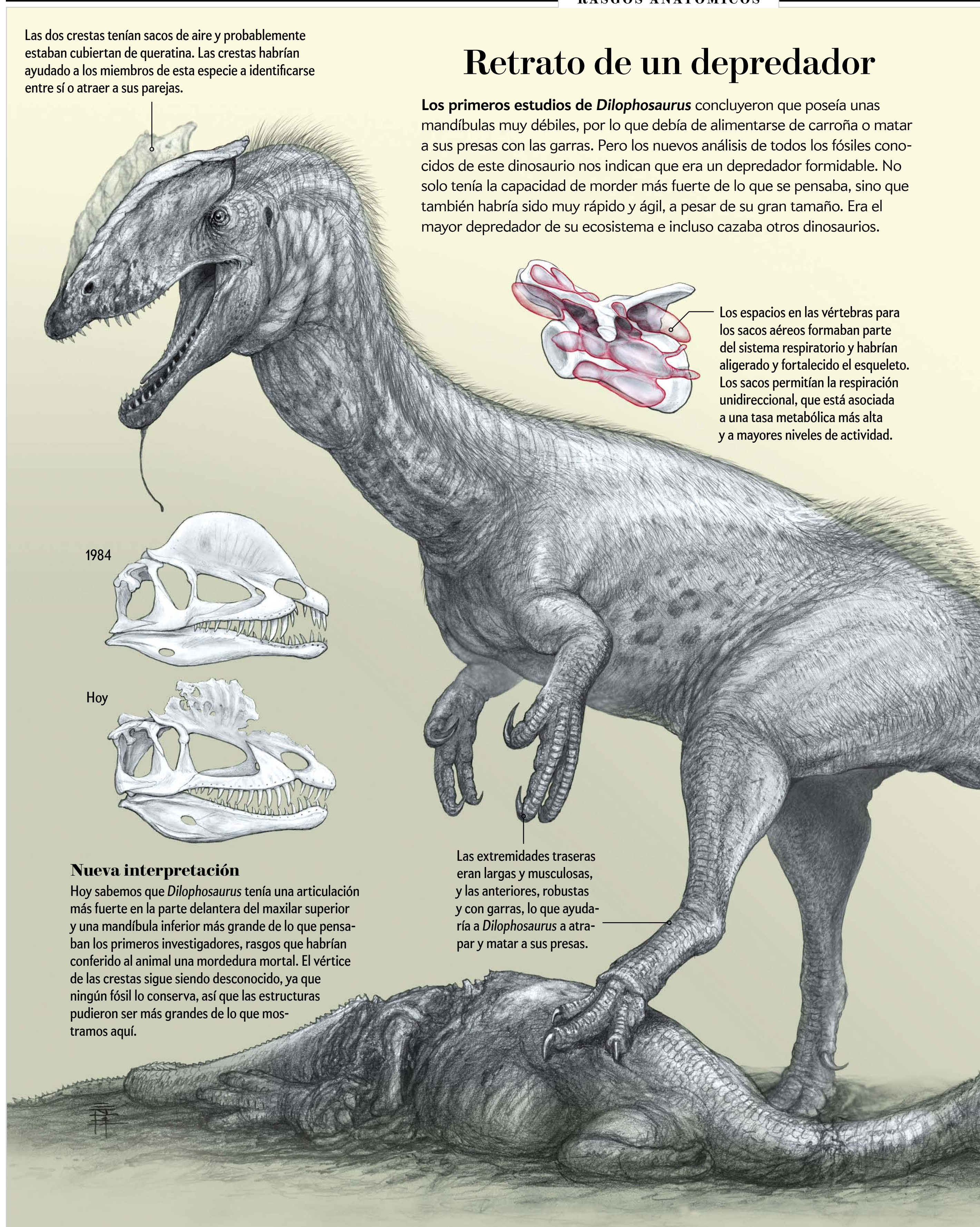
El material de *Dilophosaurus* que se ha descubierto desde la descripción inicial de Welles y la reconstrucción de Langston nos señala que el hocico y los maxilares de este animal eran mucho más robustos de lo que se pensó inicialmente. Los huesos del maxilar superior no tienen la débil articulación que sugerían los primeros fragmentos hallados. Al contrario, estos huesos indican que el cráneo era fuerte y capaz de morder a las presas. Asimismo, los nuevos rasgos identificados en los huesos de la mandíbula inferior señalaban la presencia de rebordes muy marcados para las inserciones musculares. En los reptiles actuales estos rebordes se corresponden con la superficie de inserción de unos músculos grandes. Además, en el esqueleto de otro dinosaurio hallado en el mismo yacimiento excavado por el equipo de Austin, el herbívoro *Sarahsaurus*, se han reconocido unas marcas de mordeduras que indican que fueron provocadas por un gran carnívoro con maxilares lo suficientemente fuertes como para perforar el hueso.

Continúa en la página 22

GETTY IMAGES/SUWATWONGKHAM/ISTOCK

Retrato de un depredador

Los primeros estudios de *Dilophosaurus* concluyeron que poseía unas mandíbulas muy débiles, por lo que debía de alimentarse de carroña o matar a sus presas con las garras. Pero los nuevos análisis de todos los fósiles conocidos de este dinosaurio nos indican que era un depredador formidable. No solo tenía la capacidad de morder más fuerte de lo que se pensaba, sino que también habría sido muy rápido y ágil, a pesar de su gran tamaño. Era el mayor depredador de su ecosistema e incluso cazaba otros dinosaurios.

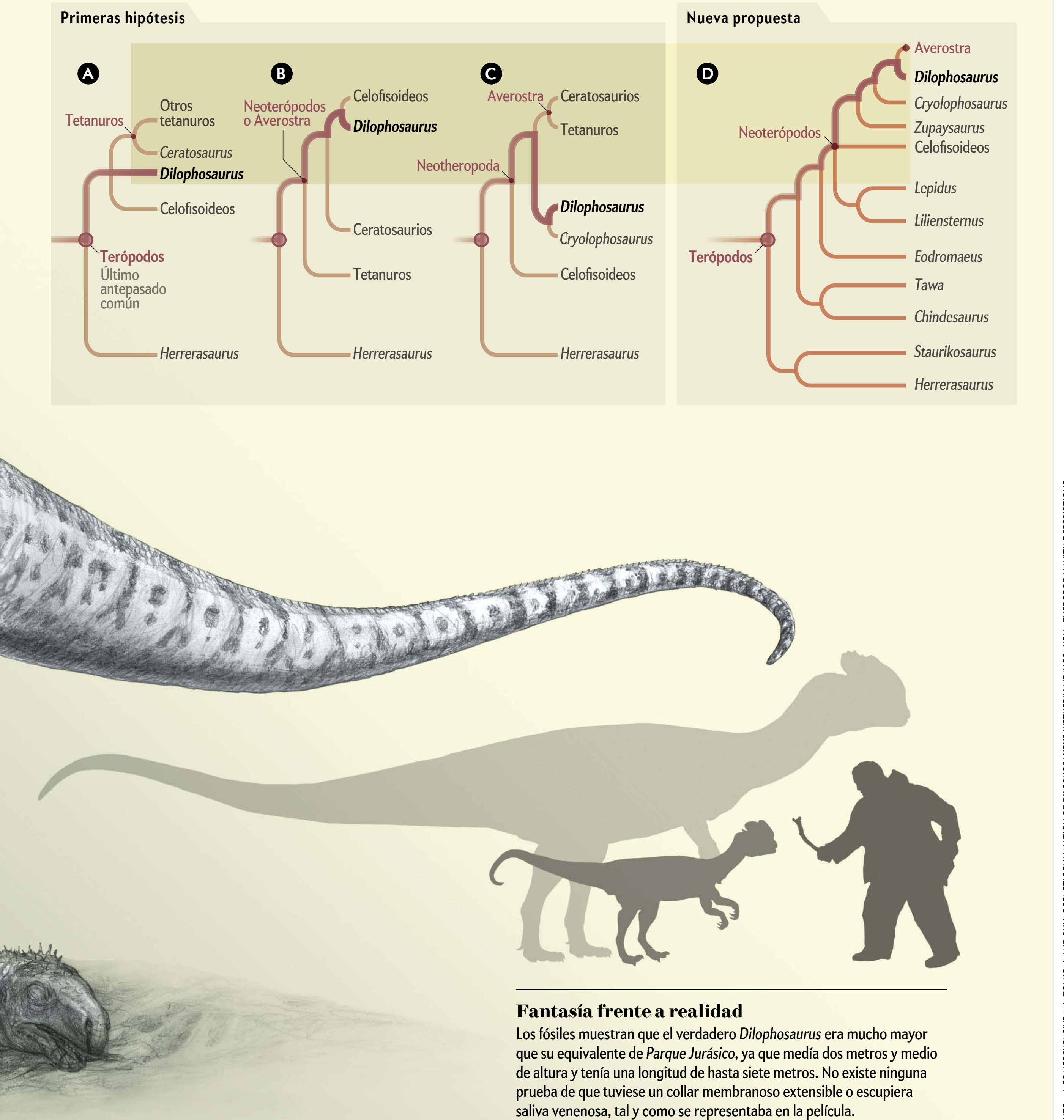


Nueva interpretación

Hoy sabemos que *Dilophosaurus* tenía una articulación más fuerte en la parte delantera del maxilar superior y una mandíbula inferior más grande de lo que pensaban los primeros investigadores, rasgos que habrían conferido al animal una mordedura mortal. El vértice de las crestas sigue siendo desconocido, ya que ningún fósil lo conserva, así que las estructuras pudieron ser más grandes de lo que mostramos aquí.

Un árbol redibujado

Los paleontólogos llevan tiempo intentando desentrañar qué parentesco mantiene *Dilophosaurus* con otros dinosaurios. Los primeros estudios concluyeron que estaba más estrechamente relacionado con los celofisoideos **A**, los ceratosaurios **B** y otros terópodos con cresta **C**. Samuel Welles, que publicó las primeras descripciones de fósiles de *Dilophosaurus*, sugirió que los restos podrían incluso pertenecer a más de un género de dinosaurio. Pero el último análisis más completo de los rasgos anatómicos de *Dilophosaurus* nos indica que los fósiles pertenecen a una sola especie. La comparación de sus rasgos con los de otros dinosaurios de todo el mundo revela que está más cerca de los grandes terópodos del Jurásico **D**. Pero la amplia distancia evolutiva entre estos dos grupos implica que quedan por descubrir parientes más cercanos de *Dilophosaurus*.



Fantasía frente a realidad

Los fósiles muestran que el verdadero *Dilophosaurus* era mucho mayor que su equivalente de *Parque Jurásico*, ya que medía dos metros y medio de altura y tenía una longitud de hasta siete metros. No existe ninguna prueba de que tuviese un collar membranoso extensible o escupiera saliva venenosa, tal y como se representaba en la película.

FUENTE: «A COMPREHENSIVE ANATOMICAL AND PHYLOGENETIC EVALUATION OF ***DILOPHOSAURUS WETHERILLI*** (DINOSAURIA, THEROPODA) WITH DESCRIPTIONS OF NEW SPECIMENS FROM THE KAYENTA FORMATION OF NORTHERN ARIZONA». ADAM D. MARSH Y TIMOTHY B. ROWE EN ***JOURNAL OF PALEONTOLOGY***, VOL. 94, JULIO DE 2020 (*árboles evolutivos*); ILLUSTRACIONES DE BRIAN ENGH (*reconstrucciones*) Y DAISY CHUNG (*árboles evolutivos*)

Viene de la página 19
En resumen, las pruebas apoyan la idea de que *Dilophosaurus* era probablemente un depredador con una mordedura mortal, y no la idea que tenía Welles de un animal que se alimentaba de carroña o usaba las garras para matar.

Dilophosaurus era un dinosaurio especialmente grande para su época. La mayoría de los que vivieron en el Triásico superior en el oeste de Norteamérica, solo 20 millones de años antes, tenían el tamaño de pavos o águilas. Pero *Dilophosaurus* era más alto que un humano (de pie podía alcanzar dos metros y medio) y alcanzaba siete metros de largo en su desarrollo máximo. Poseía unas patas delanteras mucho más largas y fuertes que las de otros dinosaurios carnívoros más grandes, como *Allosaurus* y *Ceratosaurus*, y sus patas traseras también eran relativamente más largas. Cuando se descubrieron los primeros esqueletos de *Dilophosaurus*, los científicos pensaron que estaba emparentado con los llamados carnosaurios, como *Allosaurus* y *Streptospondylus*. Por este motivo las partes faltantes de la pelvis se reconstruyeron utilizando estos dinosaurios como modelo. Los esqueletos de *Dilophosaurus* encontrados más tarde tienen una mejor preservación de la pelvis y muestran que su anatomía era intermedia entre *Coelophysis* y *Allosaurus,* del Triásico superior y del Jurásico superior, respectivamente.

Al igual que muchos de los primeros dinosaurios y todas las aves actuales, el sistema respiratorio de *Dilophosaurus* tenía sacos aéreos en las vértebras, lo que proporciona resistencia y a la vez ligereza al esqueleto. Los sacos permitían el flujo unidireccional del aire a través de los pulmones, es decir, todo el ciclo se activaba en cada respiración, como sucede en las aves y en los cocodrilos. Este tipo de respiración proporciona al animal más oxígeno que el sistema bidireccional de los mamíferos, en el que el aire fluye hacia dentro y hacia fuera de los pulmones. Los animales que respiran unidireccionalmente tienden a presentar tasas de metabolismo relativamente altas y, por lo tanto, pueden desempeñar una actividad elevada. Así que probablemente *Dilophosaurus* fue un cazador rápido y ágil.

La tomografía computarizada nos muestra la presencia de estos sacos aéreos en los huesos que rodeaban el encéfalo del dinosaurio y que se conectaban con las cavidades de los senos nasales en la parte anterior del cráneo. La mayoría de los dinosaurios carnívoros exhiben una reborde óseo que forma como un techo encima de la fenestra antorbital, una abertura en el cráneo delante de las cuencas de los ojos. Pero en *Dilophosaurus*, estas aberturas continúan hacia los lados y conectan con las crestas del dinosaurio, lo que sugiere que quizás estas también tenían sacos aéreos. Muy posiblemente, las crestas estarían cubiertas por queratina, el mismo material que forma los cuernos, las garras y el pelo, y pudieron haber ayudado al animal a identificar a sus congéneres y a atraer a posibles parejas. De cualquier forma, no estamos seguros de la contribución de los sacos aéreos a estas u otras funciones de las crestas.

Uno de las dificultades cuando estudiamos la historia evolutiva de cualquier especie es comprender la variación anatómica dentro y entre los grupos taxonómicos. Welles pensó que los diversos esqueletos que ahora se atribuyen a *Dilophosaurus* representaban múltiples géneros. Mediante el empleo de las últimas herramientas cladísticas, uno de nosotros (Marsh) comprobó esta hipótesis al identificar cientos de rasgos anatómicos en cada esqueleto y comparándolos entre sí. Los resultados de este análisis muestran que, contrariamente a lo que supuso Welles, todos los esqueletos se asemejan tanto entre sí que deben corresponder no solo a un género sino incluso a la misma especie.

Marsh también incorporó estas características anatómicas a una base de datos mucho más amplia para comparar *Dilophosaurus* con otros fósiles de otras partes del mundo. Este análisis esclarece la historia evolutiva y la distribución biogeográfica de distintos grupos de dinosaurios y nos permite ubicar con mayor precisión a *Dilophosaurus* en el árbol de la vida. Así sabemos que entre *Dilophosaurus* y sus parientes más cercanos hay una separación evolutiva notable, lo que significa que muchos de sus parientes más cercanos todavía no han sido descubiertos.

PISTAS CONTEXTUALES

A la vez que hemos ido recabando detalles sobre *Dilophosaurus*, también ha crecido nuestra comprensión del mundo en el que vivió. Hace 183 millones de años, al inicio del período Jurásico, los dinosaurios recorrían la meseta de del Colorado dejando huellas en lo que hoy es una roca arenisca. En la actualidad, las carreteras acaban a kilómetros de este substrato y debemos conducir por dos pistas llenas de baches que cruzan campos de dunas de arenas sueltas, un aluvión del Cuaternario. Esta arena arrastrada por el viento es la que atascó nuestros vehículos en 2014. Debajo de las dunas actuales se halla la arenisca de Navajo, una roca litificada que contiene los sedimentos desérticos de hace más de 180 millones de años. Las tierras baldías rojizas de Ward Terrace, como se conoce esta zona, se extienden hacia el oeste, donde se encuentran con los picos volcánicos mucho más jóvenes de la sierra de San Francisco, en Flagstaff, Arizona. Al noroeste se sitúa uno de los lugares más visitados del mundo por sus características geológicas, el Gran Cañón.

LOS FÓSILES de *Dilophosaurus* proceden de dos yacimientos del norte de Arizona que datan del Jurásico inferior, poco después de que el supercontinente Pangea comenzara a dividirse.

Desde las arenas donde quedamos atrapados en lo alto de Ward Terrace hasta el esquisto de Vishnu, una roca negra que aparece en el fondo del Gran Cañón al ser excavado por el río Colorado, estos paisajes conservan gran parte de los últimos 1800 millones de años de historia geológica de la Tierra. Los paleontólogos trabajamos para conocer la vida sepultada en estos depósitos, y utilizamos distintas pruebas geológicas y biológicas preservadas en las rocas para reconstruir el ambiente pasado.

Uno de nuestros objetivos consistía en medir con mayor precisión la edad de la roca en la que se descubrieron los huesos de *Dilophosaurus*, denominada formación Kayenta. Esta fue

FUENTE: CHRISTOPHER R. SCOTESE (*mapa paleogeográfico*); DAISY CHUNG (*mapa*)

depositada por ríos, lagos y arroyos al este de un arco volcánico que generaba cenizas y partículas finas en toda el área. La ceniza contribuyó a conservar los fósiles y también nos ayudó a determinar la edad de la formación. Recogimos muestras de rocas para datarlas mediante métodos radiométricos, a partir de la proporción entre el uranio y el plomo que contenían. En el caso del yacimiento de *Dilophosaurus*, establecimos una antigüedad de unos 183 millones de años.

Dilophosaurus vivió, por tanto, durante el Jurásico inferior, entre 5 y 15 millones de años después de la extinción masiva del final del Triásico. En ella desaparecieron unas tres cuartas partes de los organismos del planeta, incluidos la mayoría de los grandes reptiles que competían por los recursos con los primeros dinosaurios. Es probable que esta extinción masiva fuese provocada por la ruptura inicial del supercontinente Pangea cuando el océano Atlántico norte se abrió como una cremallera volcánica. A lo largo del Triásico superior y el Jurásico inferior, la placa tectónica norteamericana se desplazó hacia el norte desde un cinturón climático subtropical hasta otro más árido, por lo que la ubicación en la que vivió *Dilophosaurus* se movió desde una latitud de la actual Costa Rica hasta el norte de México. Es decir, cuando se depositó la formación Kayenta, el ambiente era estacionalmente seco, y se formaban dunas de arena periódicas en las zonas más húmedas, donde vivían estos animales.

Otros fósiles encontrados en la formación nos indican cómo encajaba *Dilophosaurus* en su ecosistema. Era el mayor depredador del oasis fluvial que habitaba, con una vegetación de coníferas extendiéndose a lo largo de un mar de arena. En el museo de la Universidad de Texas en Austin se conservan los esqueletos de dos individuos de *Sarahsaurus*, unos dinosaurios herbívoros de cuello largo hallados en la misma cantera. Estos vivían junto a un dinosaurio carnívoro más pequeño llamado *Megapnosaurus* y un pequeño dinosaurio acorazado llamado *Scutellosaurus*. El fósil más común en la formación Kayenta es una tortuga primitiva *Kayentachelys*, que nadaba junto a peces óseos escamosos, celacantos de agua dulce y peces pulmonados. Entre las posibles presas de *Dilophosaurus* vivían también parientes muy primitivos de los mamíferos, como los tritilodóntidos, parecidos a los castores, y los morganucodóntidos, similares a las ratas.

FÓSILES PARA TODOS

En *Parque Jurásico* se presenta una excavación paleontológica donde se extrae un esqueleto completo de un velocirráptor cepillando suavemente el sedimento. En la realidad, los fósiles de dinosaurios suelen hallarse dentro de rocas, rotos en fragmentos apenas identificables. En un día de suerte puede aparecer un hueso más entero. Gracias al estudio anatómico completo publicado el pasado verano por Marsh, *Dilophosaurus* se ha convertido en el dinosaurio del Jurásico inferior mejor documentado de todo el mundo. Pero se ha tardado décadas en encontrar restos adicionales que permitiesen conocer algunos detalles de su anatomía. También han hecho falta varias generaciones de paleontólogos para interpretar los fósiles.

Los museos desempeñan una función vital para facilitar este trabajo. Estas instituciones albergan grandes colecciones de especímenes que son la base de toda investigación científica. Equipos especializados de conservadores, archiveros y administradores deben documentar y conservar cuidadosamente los fósiles para que estas colecciones sean en todo momento accesibles a los investigadores. La repetibilidad es un principio fundamental de la ciencia, ya que otros expertos deben poder corroborar nuestros hallazgos. En paleontología, esto significa que los fósiles deben conservarse en un museo para que las futuras generaciones de científicos puedan volver a examinarlos y verificar los datos.

La Nación Navajo se ha asociado con museos que se preocupan por estos fósiles no solo para preservar los huesos en sí, sino también los archivos y los datos asociados a ellos. En 2015, cuando quisimos realizar esta investigación y localizar el yacimiento donde se descubrieron inicialmente los restos de *Dilophosaurus*, tuvimos la suerte de conocer a John Willie, un pariente de Jesse Williams, el hombre navajo que encontró los primeros fósiles en 1940. Willie nos acompañó hasta el yacimiento y nos explicó que los recursos naturales de la Nación Navajo son extremadamente importantes para la Diné (el pueblo Navajo). Su territorio es uno de los mejores lugares en el mundo para ver rocas terrestres del inicio del Mesozoico, y su Departamento de Minerales ha facilitado mucho la investigación científica, lo que incluye la aprobación de permisos para el trabajo de campo, los préstamos de fósiles y la revisión de manuscritos científicos.

El conocimiento científico supone construir y reevaluar nociones antiguas y, en ocasiones, cambiarlas. Es emocionante cuando la información adquirida con esfuerzo se filtra en la cultura popular. Con la franquicia de películas de *Parque Jurásico*, que lanzará su sexta entrega en 2022, esperamos ver de nuevo cómo se representa la paleontología.

En ocasiones también sucede lo contrario y la cultura popular se filtra en la ciencia, a veces literalmente. Langston contó que en las décadas de 1930 y 1940, mientras reparaban fósiles en Berkeley, los paleontólogos disolvían en acetona tiras de película de acetato de celulosa para hacer pegamento, en lugar de utilizar otros más caros o difíciles de adquirir. Es decir, *Dilophosaurus* está presente en el mundo del cine. Pero tal vez también haya algo de las películas en *Dilophosaurus*.

PARA SABER MÁS

***Dilophosaurus* (Reptilia, Saurischia), a new name for a dinosaur.** Samuel P. Welles en *Journal of Paleontology*, vol. 44, n.º 5, pág. 989, septiembre de 1970.

A comprehensive anatomical and phylogenetic evaluation of *Dilophosaurus wetherilli* (Dinosauria, Theropoda) with descriptions of new specimens from the Kayenta Formation of northern Arizona. Adam D. Marsh y Timothy B. Rowe en *Journal of Paleontology*, vol. 94, suplemento S78, págs. 1-103, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Dinosaurios de un continente desaparecido. Scott D. Sampson en *IyC*, mayo de 2012.

¿Qué causó la extinción de los dinosaurios? Stephen Brusatte en *IyC*, febrero de 2016.

El inesperado triunfo de los dinosaurios. Stephen Brusatte en *IyC*, julio de 2018.

COSMOLOGÍA

EL ENIGMA DE LOS PROTOCÚMULOS DE GALAXIAS

Nuevas observaciones del universo primitivo han revelado la existencia de cúmulos de galaxias mucho mayores de lo que se creía posible

Arianna S. Long

Ilustración de Ron Miller



Arianna S. Long es estudiante de doctorado en la Universidad de California en Irvine. Su investigación se centra en la evolución de los cúmulos de galaxias.





L IGUAL QUE LOS ÁRBOLES, LAS PERSONAS O LAS ESTRELLAS, TAMBIÉN las galaxias tienen un ciclo vital. Una galaxia nace cuando el gas y las estrellas se juntan para dar lugar a una estructura coherente. El proceso puede comenzar con una gran nube de gas que acumula masa lentamente, o bien a partir de la fusión de dos o más nubes. En cualquier caso, una vez formada, la galaxia pasa su vida engendrando estrellas a partir de sus reservas de gas. Decimos que una galaxia está «viva» cuando emite radiación ultravioleta intensa, un indicio de la presencia de estrellas jóvenes, brillantes y calientes. A medida que envejecen, la luz de las estrellas cambia: deja de ser azul para tornarse más amarilla o rojiza. Cuando una galaxia consta en su mayor parte de estrellas amarillas y rojas y emite poca o ninguna radiación ultravioleta, decimos que está «muerta». Con el tiempo, si posee suficiente masa, se convertirá en un amasijo esferoidal. Estos objetos se conocen como galaxias elípticas, y es probable que nunca vuelvan a alumbrar nuevas estrellas.

En el universo cercano que nos rodea (en un radio de entre 300 y 600 millones de años luz) hay galaxias elípticas muertas o moribundas, las cuales se congregan en enormes cúmulos galácticos. Estas grandes estructuras contienen los restos fosilizados de las galaxias más masivas jamás formadas: cientos o miles de ellas, bailando con parsimonia las unas alrededor de las otras y ligadas gravitacionalmente para siempre en su tumba perpetua.

No obstante, los cúmulos galácticos plantean un problema. La mayoría parece haberse formado cuando el universo tenía la mitad de su edad actual. Eso implica que las galaxias que los componen tuvieron que engendrar gran parte de sus estrellas en los albores de la historia cósmica. En concreto, tales galaxias parecen haber crecido hasta alcanzar el tamaño de la Vía Láctea o más unos 10.000 millones de años antes. Los jóvenes cúmulos de galaxias donde se formaron, los llamados protocúmulos, debieron ser lugares muy activos y violentos, repletos de galaxias que producían estrellas a un ritmo vertiginoso. Sin embargo, nuestra comprensión actual de la física no consigue explicar cómo pudieron crecer tanto en tan poco tiempo.

Los protocúmulos son estructuras muy distantes (su luz ha tenido que viajar 10.000 millones de años o más hasta alcanzarnos) y que suelen esconder sus galaxias más masivas tras grandes nubes de polvo. Por ello, hasta hace poco no disponíamos de las herramientas telescópicas necesarias para observarlos. En los últimos años, sin embargo, los astrónomos han descubierto dos protocúmulos que han abierto una ventana sin precedentes al proceso de crecimiento de los grandes conjuntos de galaxias. Las

EN SÍNTESIS

Los cúmulos de galaxias del universo actual suelen estar formados por galaxias muy masivas y «muertas», las cuales ya no producen nuevas estrellas. Hace tiempo que los astrónomos se preguntan por la evolución de estas estructuras.

Varios trabajos recientes han estudiado dos protocúmulos de galaxias cuando el universo era extremadamente joven. Las observaciones se remontan a la época en que el cosmos apenas tenía el 10 por ciento de su edad actual.

Uno de esos protocúmulos, el Núcleo Rojo Distante, presenta una masa mucho mayor de lo que se creía posible para esa época cósmica. Explicar su formación podría obligar reconsiderar varios aspectos de la evolución del universo como un todo.



ESA/HUBBLE/NASA/PROYECTO RELICS

GALAXIAS CONGREGÁNDOSE: El cúmulo de galaxias RXC J0032.1+1808, en una imagen del telescopio espacial Hubble. Una nueva línea de investigación intenta encontrar las estructuras del universo primitivo a partir de las cuales se formaron estas agrupaciones de galaxias.

observaciones posteriores han revelado que, en efecto, se trata de estructuras activas y gigantescas: tan enormes que desafían nuestra comprensión del proceso de formación de galaxias. No en vano, resolver el enigma que plantean los cúmulos galácticos podría obligarnos a redefinir lo que sabemos sobre la evolución del universo.

A LA CAZA DE BROTES ESTELARES

El tipo más común de galaxia formadora de estrellas produce al año una cantidad equivalente a entre uno y varias decenas de soles. Esta clase de galaxias, a la que pertenece también la Vía Láctea, se consideran «normales». A modo de metáfora, podemos compararlas con una tortuga: crean estrellas sin prisa pero sin pausa durante unos 10.000 millones de años, tiempo durante el cual permanecen azules y conservan su forma de disco, mientras agotan sus reservas de gas (el combustible de las nuevas estrellas) a un ritmo pausado.

Por su parte, las llamadas «galaxias con brote estelar» son aquellas que producen entre cientos y miles de estrellas cada año. Estas vendrían a ser las liebres de la evolución galáctica. En no más de 300 millones de años, irrumpen en la existencia, forman un gran número de estrellas y, en un abrir y cerrar de ojos cósmico, agotan su combustible. Viven deprisa y mueren jóvenes. Los astrónomos las consideran las mejores candidatas

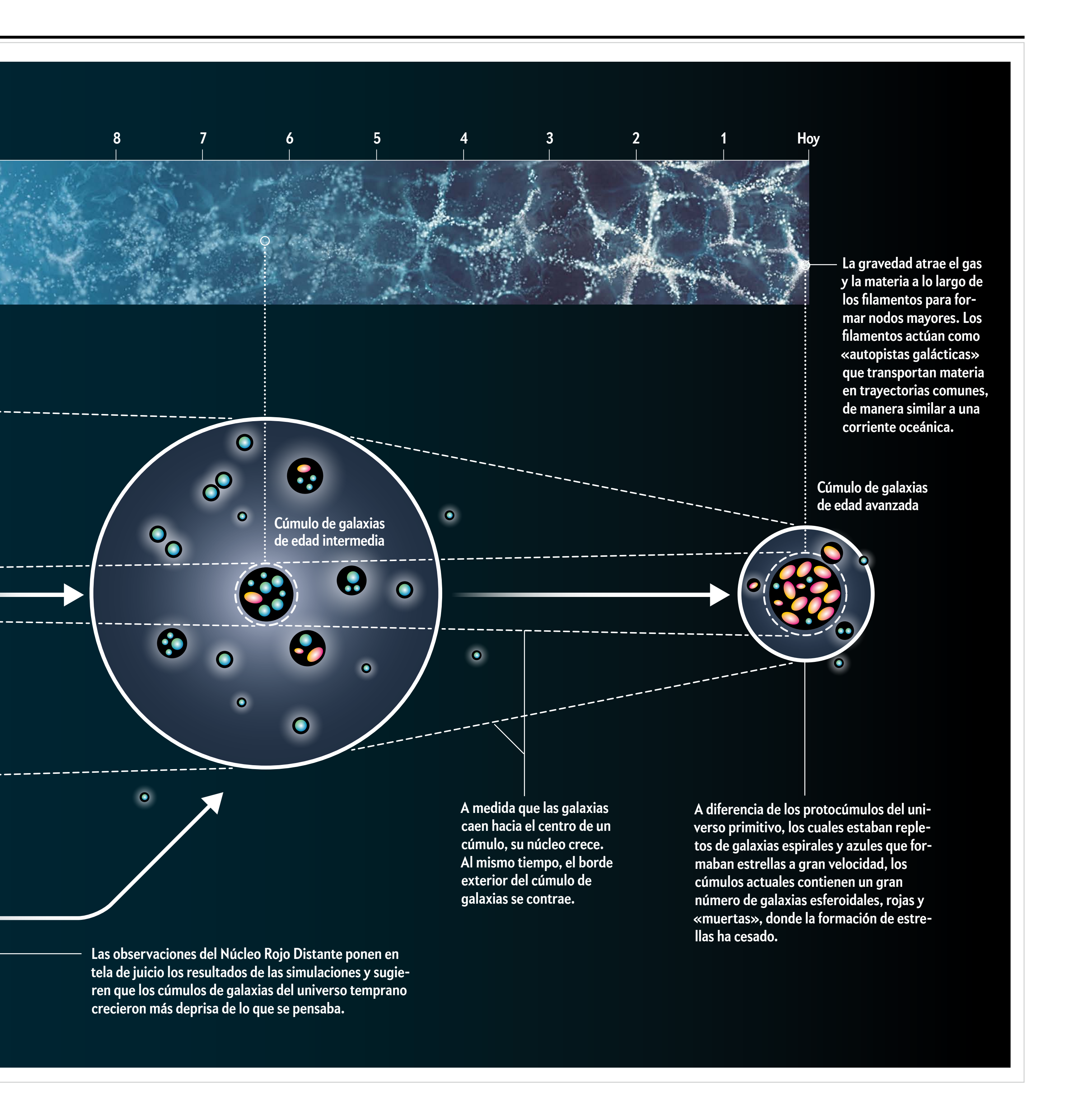
¿Cómo crecen los cúmulos de galaxias?

En la actualidad, los cúmulos galácticos se encuentran repletos de galaxias enormes y en su mayoría «muertas»; es decir, que ya no forman nuevas estrellas. En fecha reciente se han descubierto varios protocúmulos lejanos (los progenitores de los cúmulos modernos) rebosantes de galaxias jóvenes y que están engendrando estrellas. Sin embargo, su tamaño es tan descomunal y sus galaxias tan masivas que los astrónomos se preguntan cómo pudieron crecer hasta tal punto en un momento tan temprano de la historia cósmica.

FUENTE: «GALAXY PROTOCLUSTERS AS DRIVERS OF COSMIC STAR FORMATION HISTORY IN THE FIRST 2 GYR», BY YI-KUAN CHIANG ET AL. EN *ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS*, VOL. 844, AGOSTO DE 2017 (*simulaciones*)

a constituir los ancestros de las grandes galaxias elípticas y muertas que hoy vemos en los cúmulos.

Cabe imaginar que, si sondeáramos en profundidad el espacio, hallaríamos protocúmulos repletos de galaxias con brote estelar; los antecedentes de los cúmulos muertos del mañana. Sin embargo, su búsqueda se ha revelado problemática. Hasta hace poco, la mayoría de los métodos empleados para detectar cúmulos galácticos estaban principalmente orientados a encontrar galaxias elípticas moribundas o el gas caliente que impregna el espacio entre ellas. Pero tanto las galaxias elípticas como el gas intracumular aparecen en las etapas finales del proceso de evolución de los cúmulos, por lo que localizar sus homólogos más jóvenes requiere usar otras técnicas. Para complicar las cosas, los protocúmulos suelen estar mucho más dispersos por el firmamento, ya que sus galaxias aún no han tenido tiempo de



RON MILLER Y JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

acercarse lo suficiente para formar las densas estructuras que vemos hoy. Y dado que nuestros instrumentos más famosos y precisos (como el telescopio espacial Hubble, por ejemplo) disponen de cámaras que solo abarcan el diámetro de un lápiz, no es de extrañar que resulte difícil armar un rompecabezas cuyas piezas se encuentran esparcidas por el firmamento a lo largo de distancias cien veces mayores que las que cubre el campo de visión de nuestros telescopios.

Otros métodos de búsqueda, como sondear de una manera sistemática extensas franjas de cielo, tienden a pasar por alto las galaxias con brote estelar, ya que estas se encuentran a menudo ocultas por el polvo. La elevada velocidad a la que forman estrellas genera grandes cantidades de metales pesados, producidos en explosiones de supernova. Una vez dispersados por el espacio, los elementos pesados como el hierro, el carbono y el oro forman complejas moléculas de polvo que absorben la luz ultravioleta y visible. Piense en el color enrojecido que adquiere el Sol tras el humo de un incendio: el polvo atenúa la luz azul y dejan pasar la roja. Como resultado, las galaxias con brote estelar son invisibles cuando se observan con telescopios

de luz visible o ultravioleta, pero brillan como faros en la zona infrarroja del espectro.

Todo ello significa que, hasta hace poco, las herramientas para buscar y estudiar protocúmulos solían pasar por alto una población clave de galaxias. Entre finales de los años noventa y principios de la década pasada, el Conjunto Bolométrico Submilimétrico de Uso Común (SCUBA), el Telescopio del Polo Sur y los observatorios espaciales Herschel y Spitzer revolucionaron nuestra compresión del universo oscurecido por el polvo con el descubrimiento de millones de galaxias que hasta entonces habían permanecido invisibles. Hace unos 15 años, los astrónomos comenzaron a estudiar la distribución de galaxias con brote estelar y hallaron que estas solían encontrarse cerca de otras de su misma clase. Sin embargo, la tecnología seguía a la zaga de nuestras ambiciones. La resolución de los telescopios milimétricos y de infrarrojos era aún tan baja que muchas galaxias situadas a lo largo de la misma línea de visión se percibían como un único objeto. Había llegado la era de la astronomía infrarroja, pero hacían falta instrumentos más sensibles y precisos para comprender realmente lo que estábamos viendo.

Por fin, en 2013 entró en funcionamiento el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA). Formado por casi 70 antenas situadas en el desierto chileno, el instrumento se comporta como un solo telescopio con una resolución hasta 600 veces mayor que la del telescopio Herschel. Desde entonces, ALMA ha transformado numerosos ámbitos de la astronomía, incluido el campo de la evolución galáctica (tal ha sido su impacto que conozco a varias personas con tatuajes dedicados a este observatorio). En particular, se trata de un instrumento excelente para detectar criaderos estelares llenos de gas y polvo en galaxias con brotes de formación estelar. Gracias a él, los astrónomos han descubierto varios sistemas tan fascinantes como sobrecogedores.

UN COLOSO INEXPLICABLE

En 2018, dos equipos independientes utilizaron el observatorio ALMA para estudiar los objetos infrarrojos más brillantes que pudieron encontrar en el universo lejano. Cada uno descubrió un conglomerado distinto de galaxias polvorientas y con brote estelar que, en las imágenes tomadas por la primera generación de telescopios infrarrojos, habían aparecido disfrazadas como una única estructura. Las dos agrupaciones detectadas, SPT2349-56, formada por 14 galaxias, y el Núcleo Rojo Distante, compuesto por 10, se hallaban en realidad en diferentes rincones del universo, creciendo y desarrollándose cuando el cosmos apenas tenía el 10 por ciento de su edad actual. Ambos protocúmulos estaban viviendo brotes extremos de formación estelar: cada uno generaba al año 10.000 veces más estrellas que la Vía Láctea, y ello en un volumen la mitad de grande que el Grupo Local (el conjunto que forman nuestra galaxia, Andrómeda y otras galaxias menores). Las reservas de gas estimadas indicaban que, si aquellas galaxias continuaban formando estrellas a la misma velocidad, agotarían su combustible en pocos cientos de millones de años, tras lo cual quedarían convertidas en grandes galaxias elípticas rojas y muertas. Además, completarían ese ciclo mucho antes de llegar a la época cósmica actual.

El hallazgo de esos dos conjuntos de galaxias primigenias y oscurecidas por el polvo ofrecía una prometedora oportunidad para estudiar el crecimiento de los cúmulos de galaxias. Pero aún faltaba algo importante. La mejor manera de «pesar» una galaxia consiste en medir la luz de sus estrellas adultas, para lo cual se necesitan datos a lo largo de todo el espectro electromagnético. Hasta hace poco, sin embargo, las observaciones relativas a los protocúmulos pertenecientes a los primeros 2000 millones de años de vida del universo se ceñían a un estrecho intervalo del espectro (o bien en el óptico, o bien en el infrarrojo). Entonces, en septiembre de 2018, nuestro grupo logró captar por primera vez la emisión óptica y ultravioleta de un protocúmulo polvoriento con brote estelar tal como se mostraba hace 12.000 millones de años. Se trataba del Núcleo Rojo Distante. Gracias a los telescopios Hubble, Géminis y Spitzer, adquirimos la perspectiva necesaria para entender el pasado y el futuro de aquella estructura.

No hay palabras capaces de describir lo que se siente al ser la primera persona que contempla una parte del universo que nunca antes ha visto nadie

Esperar datos del telescopio espacial Hubble puede resultar frustrante. Los astrónomos sabemos en qué día se observará la porción de cielo que hemos solicitado, pero no cuándo recibiremos los datos. Su llegada se nos comunica mediante una notificación por correo electrónico. El día programado para la observación de nuestro protocúmulo, tuve la sensación de estar consultando el correo cada dos minutos. Me sentí decepcionada cuando, llegada la hora de irme a dormir, aún no había recibido nada.

A la mañana siguiente, y a pesar de las protestas de mi pareja, salté de la cama y corrí al ordenador. Por suerte, los datos habían llegado en mitad de la noche. Comencé a descargarlos con impaciencia, como una niña que aguarda su turno para desenvolver los regalos. Por fin, pude ver la imagen. No hay palabras capaces de describir lo que se siente al ser la primera persona que contempla una parte del universo que nunca antes ha visto nadie. Al principio me sentí obligada a inspeccionar cada estrella y cada galaxia, a fin de certificar su existencia. Pasado un rato, me recompuse y amplié la zona de la imagen que me interesaba. En ella se ocultaba algo extraordinario.

Esta pequeña región del espacio es violenta. Al menos la mitad de las galaxias presentan una forma tan caótica que tuvieron que haber chocado con otras poco tiempo antes o estar en proceso de hacerlo. Cuando medimos la población de estrellas adultas, hallamos algo tan asombroso que podría acabar cuestionando nuestra comprensión del cosmos.

Ya en esa época primitiva, algunas de las galaxias del Núcleo Rojo Distante habían creado tres veces más estrellas que la Vía Láctea. Sin embargo, las simulaciones del universo basadas en

la física conocida tienen dificultades para reproducir galaxias tan masivas en una etapa cósmica tan temprana. Esta discrepancia entre simulaciones y observaciones agrava un problema que se conoce desde el descubrimiento de las primeras galaxias polvorientas con brote estelar. La física conocida predice que las galaxias que producen estrellas tan rápido deberían desgarrarse en pedazos o calentarse tanto que consumirían todo el gas antes de alcanzar un tamaño como el que muestran las observaciones.

Pero, además, nuestro protocúmulo planteaba otro rompecabezas: su apabullante masa. Al principio, no podía creer los números que arrojaban mis medidas, por lo que consulté a varios compañeros de mi departamento para cerciorarme de que había hecho bien los cálculos. Dos semanas después, presenté los resultados en un congreso. Recibí comentarios del tipo «tiene que haber algún error en tu código» o «¿estás segura de que no has contado nada por duplicado?». (De hecho, había un pequeño fallo en mi código, pero este no bastaba para explicar una masa tan enorme.) Al final, tras revisar los cálculos y probar con diferentes métodos, el resultado fue innegable: el Núcleo Rojo Distante parece ser demasiado grande para nuestro universo. Ignoramos cómo pudo alcanzar semejante tamaño en tan poco tiempo.

A fin de entender qué fracción de su masa se encontraba en forma de estrellas, decidimos estudiar el halo de materia oscura del protocúmulo. La materia oscura es el componente más abundante de cualquier galaxia y también del universo en su conjunto. Hasta donde sabemos, todas las galaxias y cúmulos de galaxias se hallan inmersos en gigantescas nubes, o halos, de esta misteriosa sustancia. Y aunque es invisible y desconocemos su naturaleza, revela claramente su presencia debido a sus efectos gravitatorios. Existen varios métodos para calcular la cantidad de materia oscura presente en un objeto astronómico dado, pero haría falta un artículo entero (o cinco) para describirlos todos.

Baste decir que calculamos la cantidad de materia oscura presente en el Núcleo Rojo Distante y que, según nuestras simulaciones, esta rozaba la mayor masa permitida en ese momento de la historia cósmica. Esa aparente sobreabundancia de materia oscura implica que el Núcleo Rojo Distante podría ser tan vasto que violaría las leyes del universo tal y como las entendemos. Cuando simulamos el aspecto que adoptará el Núcleo Rojo Distante tras evolucionar durante 12.000 millones de años hasta la época actual, hallamos que su tamaño bien podría superar el de El Gordo, el cúmulo de galaxias más grande conocido.

Nuestro cálculo de la cantidad de materia oscura presenta un amplio margen de error, por lo que tal vez hayamos sobreestimado su valor. No obstante, el problema se agrava cuando tenemos en cuenta que, muy probablemente, nuestras observaciones tan solo reflejan un pequeño porcentaje de las galaxias presentes en el cúmulo, ya que muchas habrán quedado fuera del limitado campo de visión de los telescopios. Es de esperar que la discrepancia aumente a medida que sigamos inspeccionando este protocúmulo.

RECONSIDERAR LA CRONOLOGÍA CÓSMICA

Sumado al hallazgo de otros protocúmulos potencialmente similares, el Núcleo Rojo Distante nos obliga a reconsiderar lo que sabemos acerca del proceso de formación de cúmulos galácticos. Dado que sus galaxias probablemente se encuentren entre las primeras que se formaron en el universo, hemos de esclarecer cómo estas estructuras tan masivas pudieron formarse tan pronto. Eso no solo implica restringir los mecanismos físicos y químicos que engendraron las estrellas en las primeras galaxias, sino las condiciones que propiciaron que la materia oscura condensase en halos a partir de los cuales crecerían las galaxias. ¿Es posible que el universo comenzara a formar estructuras antes de lo que pensábamos? De ser así, ¿qué implicaría ello para lo que sabemos acerca de la producción de elementos químicos? ¿Tenían estas primeras galaxias los ingredientes necesarios para crear estrellas con planetas habitables a su alrededor, propiciando quizá las primeras formas de vida en la historia del universo?

Puede que no vivamos lo suficiente para conocer la respuesta a todas estas preguntas, pero algunas de ellas se han convertido en objeto de un intenso estudio. En estos momentos, estamos efectuando observaciones adicionales de estos protocúmulos en todo el espectro electromagnético. También estamos desarrollando nuevos métodos para encontrar otros protocúmulos polvorientos. Descubrir más objetos de este tipo nos permitirá determinar si el Núcleo Rojo Distante representa una fase común y hasta ahora desconocida en la evolución de los cúmulos galácticos, o si, por el contrario, constituye un caso excepcional. Los astrofísicos teóricos y observacionales están colaborando para averiguar en qué momento del universo primitivo comenzaron a darse las condiciones que permitieron la formación de tales estructuras: regiones del espacio con cantidades descomunales de materia y sobrecogedoras tasas de formación estelar.

La mejor manera de verificar un modelo físico consiste en explorar sus extremos. En los próximos años, estas sorprendentes congregaciones de galaxias permitirán poner a prueba nuestra comprensión del cosmos como un todo. IyC

PARA SABER MÁS

Galaxy protoclusters as drivers of cosmic star formation history in the first 2 Gyr. Yi-Kuan Chiang et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 844, art. n.º L23, agosto de 2017.
Emergence of an ultrared, ultramassive galaxy cluster core at $z = 4$. Arianna S. Long et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 898, art. n.º 133, agosto de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El primer resplandor de las estrellas. Michael D. Lemonick en *IyC*, julio de 2014.
Nuestro lugar en el cosmos. Noam I. Libeskind y R. Brent Tully en *IyC*, septiembre de 2016.
Las primeras galaxias del universo. Dan Coe en *IyC*, enero de 2019.



INMUNOLOGÍA

Los estragos inmunitarios de la COVID-19

El virus sabotea el sistema de defensa química del organismo

Akiko Iwasaki y Patrick Wong

Ilustración de Brian Stauffer

EN SÍNTESIS

El diseño de tratamientos contra el SARS-CoV-2 depende del conocimiento profundo de su interacción con las células del cuerpo y de la respuesta inmunitaria desplegada contra él.

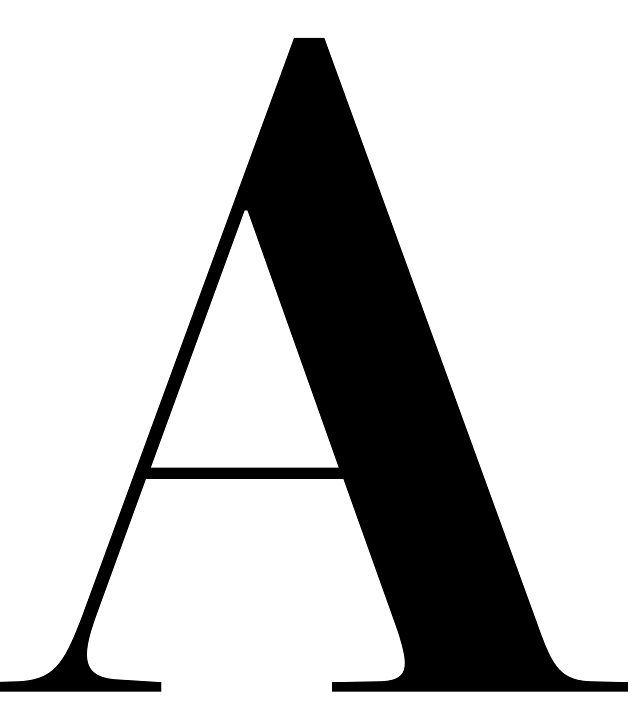
El virus desata una respuesta hiperinflamatoria por parte del sistema inmunitario que causa graves daños en todo el cuerpo. Los entresijos de este proceso se siguen dilucidando.

Además de la rápida propagación celular facilitada por su vía de entrada, y su pronta multiplicación, el virus provoca cambios en las filas de los glóbulos blancos en su provecho.

Todos estos aspectos se investigan a marchas forzadas y con una inversión de recursos inédita que ha cambiado las reglas de la investigación básica.

Akiko Iwasaki es catedrática Waldemar von Zedtwitz en el Departamento de Inmunobiología y en el Departamento de Biología Molecular, Celular y del Desarrollo en la Universidad Yale, e investigadora del Instituto Médico Howard Hughes.

Patrick Wong es estudiante de posgrado en el laboratorio de Iwasaki en la Universidad Yale.



A BUEN SEGURO RECORDAREMOS EL SIGLO XXI PARTIDO EN DOS: antes y después del SARS-CoV-2. A pesar de décadas de avisos sobre el riesgo de una pandemia mortífera de alcance mundial, los sistemas sanitarios han quedado completamente desbordados. Los primeros pacientes con COVID-19 ingresaron en un hospital de Wuhan el 16 de diciembre de 2019. Numerosos ciudadanos de todo el mundo se sintieron a salvo por las grandes distancias, aunque China no fuera capaz de contener el virus dentro de sus fronteras. Este punto de vista autocomplaciente ignoraba que los anteriores brotes de coronavirus, como el SARS-CoV (causante del síndrome respiratorio agudo y grave) y el MERS-CoV (causante del síndrome respiratorio de Oriente Medio), se extendieron por varios continentes y que este último aún no se ha logrado erradicar. El caso es que el SARS-CoV-2 se propagó por todo el globo a principios de 2020 y la respuesta sanitaria fue caótica y variopinta. Algunos Gobiernos emitieron órdenes de confinamiento domiciliario y la obligatoriedad de llevar mascarilla, mientras que otros simplemente esperaron que todo saliera bien. En el momento de escribir este artículo, los muertos ascendían a 1,3 millones en todo el planeta.

A pesar de la desorganización, los profesionales sanitarios y los investigadores se aprestaron a combatir coordinadamente la nueva amenaza antes de su llegada. Ha transcurrido menos de un año, pero gracias a la colaboración mundial ya conocemos bastante del nuevo coronavirus y de su impacto en el cuerpo humano. Empezamos a entender por qué el SARS-CoV-2 provoca enfermedades de muy distinta índole: algunas personas no muestran síntomas, mientras que otras tosen o tienen fiebre. Lo más grave es que hay quien sufre una neumonía potencialmente mortal y una afección denominada síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA). A día de hoy sabemos ya que este virus, a semejanza del SARS-CoV y el MERS-CoV, hace que el sistema inmunitario se desoriente y provoque una inflamación que acabará en el SDRA y un abanico de síntomas peligrosos. Las pruebas clínicas más a mano muestran con claridad una concentración muy elevada de proteínas inmunitarias (IL-6, TNF-α y CRP) en la sangre de los pacientes graves. A los pocos meses del inicio de la pandemia se comenzaron a administrar los prometedores inmunodepresores de amplio espectro, como los corticoides prednisona y dexametasona, que acabarían dando resultados poco satisfactorios. Al menos esto sirvió para confirmar las sospechas de que, en los pacientes más enfermos, el sistema inmunitario andaba desbocado y provocaba una hiperinflamación. Eran los mismos tratamientos antiinflamatorios adoptados contra las infecciones graves durante los brotes de los coronavirus anteriores.

Hoy sabemos que en una fracción de pacientes con COVID-19 se desata una respuesta inmunitaria desmedida que provoca daños por todo el cuerpo, con coágulos de sangre, lesiones cardíacas e incluso insuficiencia orgánica. Los casos más graves requieren el ingreso en las unidades de cuidados intensivos (UCI). El cóctel habitual de esteroides no basta para tratarlos: necesitan tratamientos más dirigidos. También precisamos con urgencia pruebas rápidas para examinar en las muestras de tejidos los indicadores biológicos (biomarcadores) que predicen el curso de la enfermedad, como, por ejemplo, la probabilidad de que un caso leve se agrave.

DESORIENTACIÓN INMUNITARIA

El desarrollo de biomarcadores y tratamientos farmacológicos se basa en un conocimiento profundo de la interacción entre el SARS-CoV-2 y las células del organismo, así como de la respuesta inmunitaria ante la llegada del virus. La pasada primavera, en colaboración con muchos laboratorios, comenzamos a explorar la desregulación inmunitaria que aparece en los casos graves de COVID-19. De buen principio sabíamos que el sistema inmunitario orquesta una intrincada cadena de mecanismos para repeler a los patógenos invasores. También que si alguna de las etapas de esa respuesta se inicia a destiempo, puede desencadenar una inflamación exagerada que daña los tejidos. Existe una respuesta rápida de emergencia y otra más lenta pero más duradera

contra virus, bacterias, hongos y demás. La primera es la respuesta «innata», en la que algunos receptores de la superficie y del interior de las células inmunitarias detectan los intrusos y activan una elaborada cascada de señalización en la que intervienen unas proteínas llamadas citocinas. Estas alertan a las células vecinas para que preparen sus defensas, inicien la muerte de las células infectadas o amplifiquen la alarma con la síntesis de otros tipos de citocinas. Las células encargadas de la respuesta innata también atraen a determinados leucocitos desde la sangre para que monten una inmunidad más duradera contra el patógeno. Al cabo de una o dos semanas se activan estos miembros del sistema inmunitario «adaptativo», que refuerzan la cantidad de anticuerpos y linfocitos T específicos que acabarán neutralizando o aniquilando al invasor.

En la mayoría de los pacientes con COVID-19, el sistema inmunitario innato desempeña su cometido a medida que aprende a neutralizar y destruir al SARS-CoV-2. Pero en casi el 5 por ciento de los casos, el contraataque no transcurre según lo previsto: cuando se tuerce la cascada de señales tan cuidadosamente programada, las células de la respuesta innata reaccionan fabricando demasiadas citocinas, una sobreproducción que recuerda la «tormenta de citocinas» que aparece en otros cuadros clínicos y que se pensó que contribuía a agravar la COVID-19. Las investigaciones más recientes apuntan a que, en la mayoría de los casos, la inflamación no es la típica tormenta, aunque también suponga una amenaza para la salud del paciente. Si provoca el SDRA, el pulmón y otros tejidos sufrirán daños duraderos. También conlleva la síntesis de fibrina, una proteína que fomenta la formación de coágulos. Y por si todo esto no bastara, la fracción líquida de la sangre comienza a filtrarse fuera de los vasos sanguíneos (extravasación), lo que desencadena una insuficiencia respiratoria.



MULTITUD DE LABORATORIOS DE TODO EL MUNDO han reorientado su línea de investigación para volcarse en la lucha contra la COVID-19. En Siena (Italia) un laboratorio de bioseguridad desarrolla una prueba de anticuerpos.

Todos los virus manipulan la maquinaria celular en su provecho para reproducirse. Una estrategia del sistema inmunitario innato consiste en sabotear esa capacidad, pero parece fallar contra el SARS-CoV-2. En los últimos meses han acaparado una gran atención los interferones, un tipo de citocinas que actúan como primera línea de defensa bloqueando la replicación del virus dentro de la célula. En teoría, la producción rápida del interferón de tipo I (IFN-I) permitiría contener el virus y no traspasar los límites de una infección leve, pero algunos estudios indican que este seguiría reproduciéndose debido a la demora en la respuesta inmunitaria en los más ancianos o en los pacientes expuestos a grandes cantidades del virus. Además, la entrada en escena de los interferones acabaría desatando una hiperreacción que estimularía la fabricación masiva de otras citocinas, que desembocaría en una inflamación y un cuadro graves. La medición de la respuesta a los interferones aportaría un conocimiento vital sobre la progresión de la COVID-19 en una enfermedad potencialmente mortal, además de algunas claves para tratar la infección.

No obstante, son tantas las maneras de poner palos en las ruedas de la respuesta inmunitaria que vamos aprendiendo sobre la marcha. Por ejemplo, el virus podría dificultar la síntesis del interferón en el enfermo. Otra posibilidad es que ciertos pacientes produzcan menos IFN-I por motivos genéticos. Hasta es posible que la respuesta inmunitaria del individuo sea tan errática que acabe fabricando anticuerpos contra el IFN-I. Somos varios los científicos que estamos investigando si la presencia de estos «autoanticuerpos» ocasionaría a la larga los síntomas de la COVID-19, en cuyo caso serviría de biomarcador para predecir el empeoramiento. Algunos pacientes también se beneficiarían de la infusión de interferón fabricado en el laboratorio. Ya han comenzado los ensayos clínicos de tales tratamientos, pero los resultados todavía no están claros.

UNA ERUPCIÓN INFLAMATORIA

La tormenta de citocinas fue noticia en los casos graves de los coronavirus precedentes (SARS-CoV y MERS-CoV), por lo que cuando apareció el SARS-CoV-2, se veía con naturalidad la intervención de un mecanismo parecido. Desde el inicio de la pandemia, los médicos detectaron una concentración alta de citocinas en los pacientes, pero su cantidad y el posterior estado inflamatorio que provocaban diferían de la tormenta típica.

Estos pacientes se veían sacudidos desde dentro por la elevada concentración de citocinas que, en función de la célula que las recibiera, tenían dispares consecuencias, algunas muy nocivas. Las citocinas como la IL-6, el TNF-α, la IL-1β y la IL-12 amplifican la inflamación y las lesiones tisulares. Diane Marie Del Valle, de la Facultad de Medicina Icahn del Monte Sinaí en Nueva York y sus colaboradores describieron una concentración notablemente elevada de algunas en la sangre de unos 1500 pacientes neoyorquinos. Esto indicaba que una elevación anómala de la concentración de IL-6 y de TNF-α podía servir como un factor pronóstico fiable de la gravedad y del riesgo de muerte.

Observamos los mismos cambios en los pacientes cuya evolución seguíamos de cerca. Además, no fuimos los únicos que comenzamos a reconocer algunos valores extremos inusuales en los perfiles de citocinas de los pacientes con respecto a los de una tormenta de citocinas típica. Observamos un incremento de la IL-5 y la IL-17, que no suelen estar vinculadas con la actividad antivírica, pues suelen aparecer como respuesta contra los parásitos y los hongos. Todavía ignoramos si esto provoca lesiones tisulares o si solo desvía recursos que de no ser así se destinarían a la lucha contra el virus.

En algunos enfermos también hallamos una gran concentración de quimiocinas, una subclase de citocinas que guían a las células inmunitarias hacia donde se las necesita. La acumulación de las quimiocinas CCL2, CCL7, CXCL9 e IL-8 generadas en los focos de infección serviría de toque de zafarrancho. No sólo se producían daños locales debido a las citocinas y a otros mensajeros inmunitarios, sino que las quimiocinas también reclutaban células de todo el organismo para incorporarse a la batalla.

Numerosos grupos de investigación han decidido fijarse en las células sanguíneas y pulmonares con el fin de descubrir el origen de las lesiones tisulares. En el campo de la inmunología

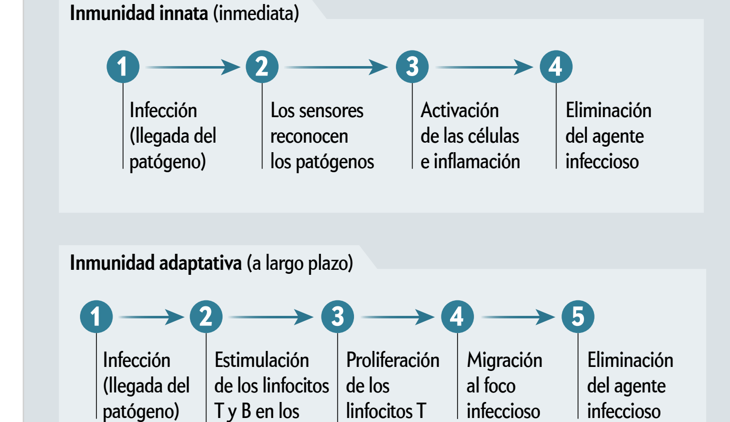
PAOLO LAZZERONI, GETTY IMAGES

La COVID-19 sabotea el sistema inmunitario de tres formas

Los virus se las ingenian para burlar las defensas del organismo. El causante de la COVID-19 sabe bien cómo eludir el contraataque exquisitamente coordinado de las células y las proteínas inmunitarias. La táctica evasiva del SARS-CoV-2 conduce a una inflamación furibunda que daña los pulmones y otros tejidos del organismo. Por medios desconocidos, también interfiere con los linfocitos T, encargados de destruir las células infectadas. Los tratamientos en desarrollo están diseñados para restaurar las defensas antivíricas del sistema inmunitario.

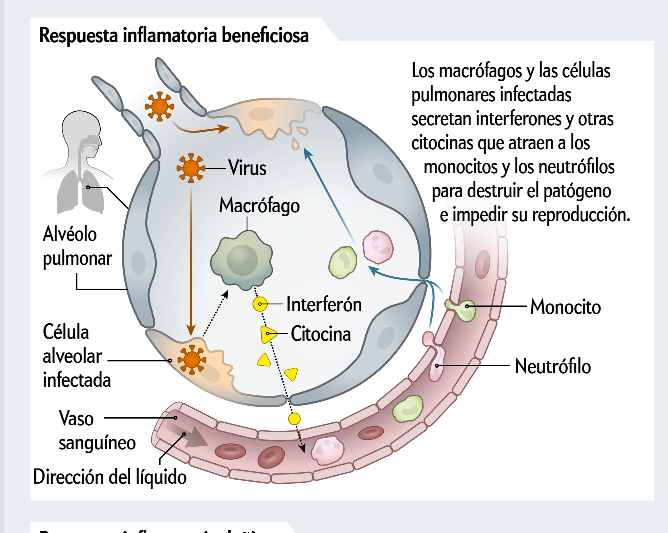
Autodefensa rápida y lenta

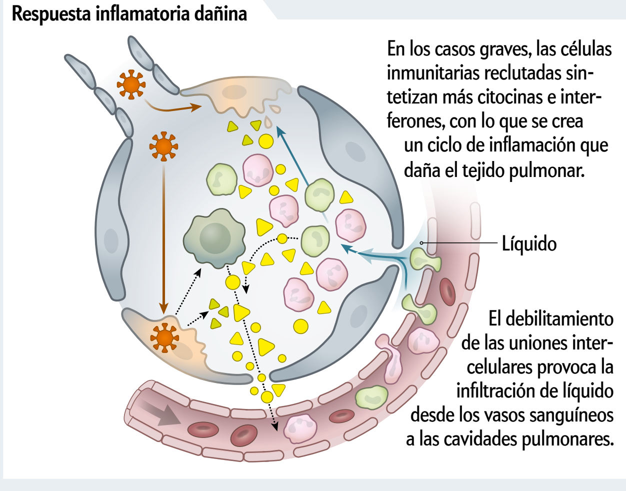
El sistema inmunitario despliega una respuesta inmediata y otra duradera contra los patógenos invasores. La rápida respuesta celular y humoral (con proteínas) desata la alarma y organiza las defensas químicas para erradicar al microbio invasor. En menos de una o dos semanas se multiplican los glóbulos blancos (los linfocitos T y los linfocitos B productores de anticuerpos) y viajan hasta el foco infeccioso, para garantizar una respuesta a largo plazo si reaparece el patógeno.



Inmunidad innata y tormentas inflamatorias

El sistema inmunitario innato destruye el SARS-CoV-2 cuando funciona debidamente. Pero este nuevo coronavirus es capaz de burlar ese proceso tan finamente calibrado y desatar el caos. El daño se agrava por la acumulación en el foco infeccioso de proteínas de señalización, citocinas. La inflamación de las células pulmonares infectadas daña los tejidos, con lo que los vasos sanguíneos cercanos comienzan a perder líquido, que entra en la cavidad pulmonar.





se emplea con profusión la citometría de flujo, pues esta técnica permite etiquetar con anticuerpos fluorescentes los diversos tipos de células sanguíneas. Gracias a estos marcadores, nuestro grupo ha sido capaz de detectar un gran cambio en la composición de las células inmunitarias circulantes de los pacientes, en contraste con la de los donantes sanos. Destacan por su abundancia dos tipos de células de la inmunidad innata: los monocitos y los neutrófilos. Veamos un ejemplo: en los donantes sanos, los monocitos suponen entre el 10 y el 20 por ciento de las células mononucleares de la sangre periférica, un conjunto de glóbulos blancos muy estudiado. En cambio, en los pacientes con COVID-19 no es nada raro que tal porcentaje se triplique (o más).

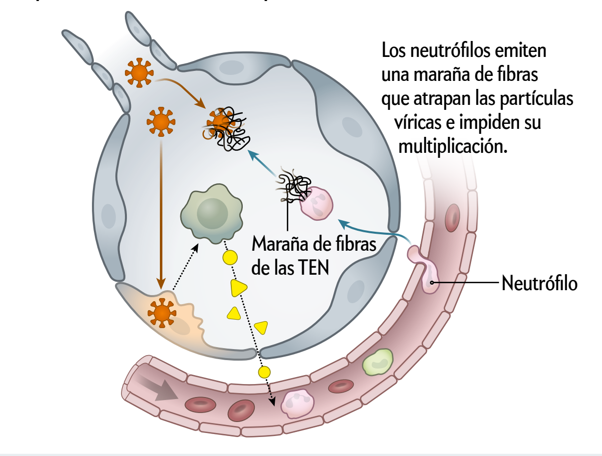
Como componente integral del sistema inmunitario innato, los monocitos patrullan por la sangre y son los primeros en iniciar la eliminación o el aislamiento de los patógenos. Cuando perciben una amenaza microbiana, responden transformándose en dos tipos de glóbulos blancos: macrófagos, que engullen patógenos y restos celulares, y células dendríticas, que reconocen y marcan los patógenos para que sean reconocidos como blanco por otras células defensivas. La cantidad de monocitos es regulada estrictamente para que el sistema inmunitario no reaccione de forma desmesurada, pero este control se pierde en los casos graves de COVID-19. En los casos peores, los monocitos y los macrófagos se infiltran en los pulmones. Cuando el equipo dirigido por Mingfeng Liao, del Centro Chino de Investigación Clínica de Enfermedades Infecciosas en Shenzen, analizó el interior de estos órganos en pacientes graves por medio de muestras celulares obtenidas del líquido de las vías respiratorias bajas con la técnica del lavado broncoalveolar (LBA), hallaron monocitos y macrófagos en abundancia. En línea con otros hallazgos, am-

JEN CHRISTIANSEN

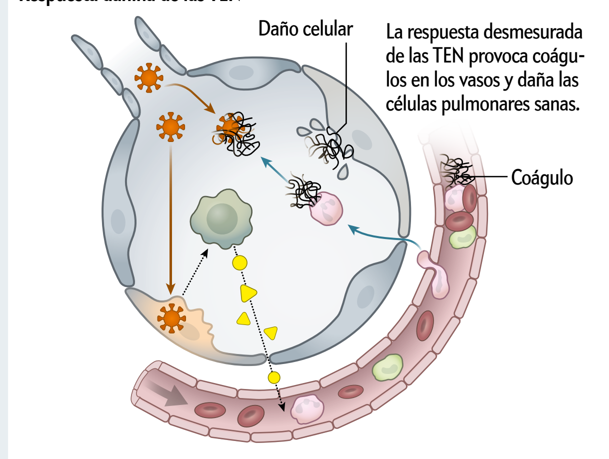
Telarañas contra microbios

Los neutrófilos, glóbulos blancos que fagocitan patógenos, proliferan en exceso en la sangre de algunos pacientes con COVID-19. Su presencia ayuda a predecir el agravamiento de la infección. Emiten una maraña de fibras —las trampas extracelulares de neutrófilos (TEN)— que aísla y elimina los virus y otros patógenos. Pero si la inflamación empeora, las TEN se vuelven tóxicas y provocan coágulos de sangre, además de daños en las células pulmonares.

Respuesta beneficiosa de las trampas extracelulares de neutrófilos (TEN)



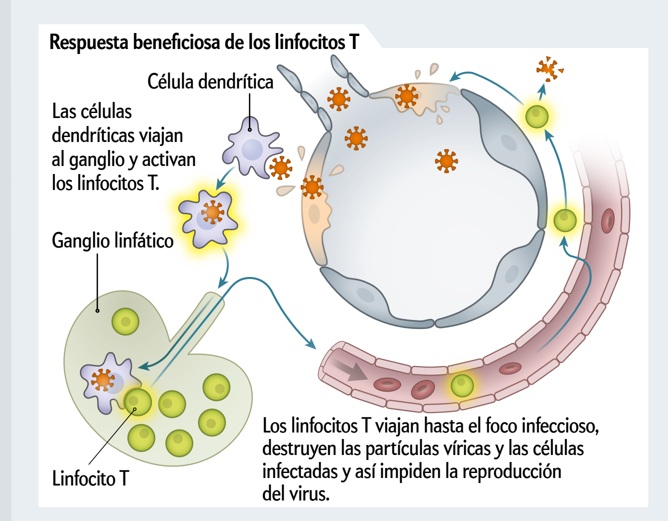
Respuesta dañina de las TEN



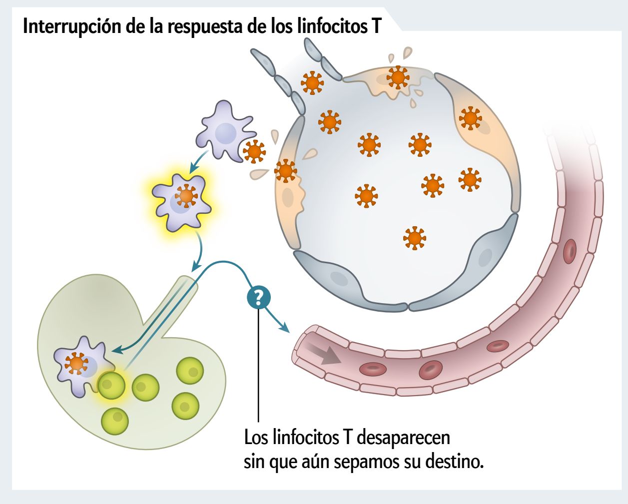
Protección duradera y linfocitopenia

La inmunidad adaptativa pone en marcha la producción de linfocitos T, que se incorporan a la lucha contra el virus con cierto retraso respecto al inicio de la infección. Tras la llamada a la acción de las células dendríticas, los linfocitos T se trasladan desde los ganglios linfáticos hasta las células infectadas. La cantidad movilizada para combatir al virus de la COVID-19 disminuye drásticamente por razones desconocidas, que se siguen estudiando.

Respuesta beneficiosa de los linfocitos T



Interrupción de la respuesta de los linfocitos T



bas células expresaban una cantidad de citocinas comparable a la de la inflamación grave. Como se supone que las citocinas, sintetizadas ante todo por los monocitos y los macrófagos, empeoran todos esos daños, todo aquello que bloquee su actividad inflamatoria impediría el agravamiento de la infección.

Si las citocinas acaban siendo las principales impulsoras de la COVID-19 grave, sería lógico que intentáramos reducirlas en los pacientes. Esto se consigue con ciertos fármacos, como el tocilizumab, que bloquea el receptor al que se acopla una citocina importante, la IL-6. Por desgracia, este fármaco no parece mejorar el desenlace de la enfermedad en los ensayos clínicos. Cada vez son más los científicos y médicos que empiezan a mirar más allá de la tormenta de citocinas en busca de una explicación más satisfactoria de los daños provocados por la respuesta hiperinflamatoria contra la COVID-19.

También parece contribuir al trastorno inmunitario de la COVID-19 un péptido o proteína pequeña llamada bradicinina. Cuando volvieron a analizar los datos del líquido pulmonar de los pacientes, Michael R. Garvin del Laboratorio Nacional de Oak Ridge en Tennessee y sus colaboradores formularon la hipótesis de que la bradicinina induciría una respuesta inflamatoria, como las citocinas. Y estas últimas empeorarían esas «tormentas de bradicinina». El exceso de esta provocaría la dilatación masiva de los vasos sanguíneos y muchos de los síntomas sorprendentes que muestran los pacientes con COVID-19, como las arritmias y las paradas cardíacas súbitas. En los enfermos de suma gravedad también se ha observado un incremento notable de la síntesis de ácido hialurónico, cuyos agregados retienen gran cantidad de agua. El encharcamiento de los pulmones que se descubre en las autopsias hace patentes las funestas consecuencias que

TESTIMONIO DE LOS AUTORES

La reconversión de nuestro laboratorio

El pasado 1 de marzo se confirmaba en Nueva York el primer caso de COVID-19, que no fue más que el anuncio de la ola más devastadora de infecciones extrahospitalarias sufrida por una ciudad estadounidense. En New Haven (Connecticut), a unos 130 km, estábamos esperando a que la Universidad Yale nos confirmase el cierre inminente, que se produjo el 18 de marzo. En muchos sentidos, nuestras vivencias coincidían con las de los demás estadounidenses sometidos a confinamiento estatal. Se mandó sin dilación a los estudiantes de vuelta a casa. A los doctorandos y a los investigadores posdoctorales se les prohibió trabajar en los laboratorios clausurados. A medida que el coronavirus se extendía por el planeta, los departamentos universitarios repletos de científicos iban quedando relegados, aunque no por mucho tiempo. Nuestra vida estaba a punto de cambiar drásticamente.

Los científicos de todos los niveles académicos se burlaban de la delgada línea que separa la vida de investigador de la personal y, a reglón seguido, se lamentaban de ello. La llegada de la pandemia mundial borró esa frontera para los que elegimos cambiar nuestra línea de investigación y centrarnos en el SARS-CoV-2. El súbito aluvión de pacientes y el apremio de la situación acabaron con el lujo de planear experimentos o de leer artículos sin prisas. Pasamos rápidamente de investigar la respuesta inmunitaria contra el cáncer, el herpes o la gripe, a desentrañar su implicación en la COVID-19. Por supuesto, la vida doméstica también dio un vuelco.

Como laboratorio especializado en la respuesta inmunitaria contra las infecciones víricas, estábamos listos para compartir nuestros conocimientos, o al menos lo que sabíamos del sistema inmunitario y nuestra experiencia en el manejo de equipos de laboratorio sofisticados. En un frenesí de actividad, empezamos a colaborar con médicos, enfermeras y gestores de numerosas facultades y departamentos de la universidad y del Hospital de Yale en New Haven. Tan pronto como comenzaron a llegar los primeros pacientes, pudimos contribuir a desvelar cómo nos enferma el SARS-CoV-2.

Formamos un nuevo equipo, denominado IMPACT (siglas, en inglés, de Implantación de Acciones Médicas y de Salud Pública contra el Coronavirus en Connecticut) que realizó a diario multitud de pruebas PCR para analizar los casos sospechosos de COVID-19. En contraste con las dos semanas que tardaban los laboratorios comerciales, nosotros íbamos como un bólido, pues en menos de 12 horas remitíamos los resultados de las muestras que nos llegaban a primera hora de la tarde. En ese momento no éramos conscientes, pero ese ritmo se convirtió en la nueva norma para la investigación y posibilitó el giro de nuestra investigación hacia el SARS-CoV-2.

La investigación académica suele avanzar a ritmo lento, pausado, pero la ciencia en los tiempos de la COVID-19 requería que fuésemos igual de metódicos en mucho menos tiempo. Que arrimáramos el hombro con las pruebas PCR acabó fructificando en un estudio minucioso de los cambios que ocurren en las células inmunitarias de los infectados por el SARS-CoV-2. Cada día recibíamos lotes de sangre de pacientes en tubos carmesíes que en pocas horas convertíamos en datos firmes. A cada paciente le tomábamos una muestra más o menos cada cuatro días, y al cabo de unos meses compilamos esas instantáneas diarias en un registro minucioso de la lucha del sistema inmunitario contra el SARS-CoV-2. Y lo más importante: estábamos aprendiendo sobre la marcha qué convertía una infección mala en una mortal.

Al mismo tiempo otros laboratorios de todo el mundo realizaban experimentos similares a toda velocidad. Como era de esperar, todo ese esfuerzo paralelo generó datos contrastables y, con más frecuencia de lo que nos gustaría, resultados contradictorios. Pero cuando se trata con pacientes, lo que importa por encima de todo es validar el descubrimiento de un laboratorio con el trabajo de los demás.

Las personas son únicas, al igual que sus tratamientos, las enfermedades concurrentes o pasadas y otros factores que escapan a nuestra capacidad de escrutinio, como a cuántos virus han estado expuestas. La solidez de esta iniciativa científica queda patente por la semejanza de las conclusiones a las que llegan los investigadores de todo el planeta.

La pandemia también ha variado el modo en que difundimos nuestros hallazgos: ya no transcurren meses hasta ver publicado el trabajo en revistas sometidas a la revisión de expertos, si no que se comparten rápidamente en servidores de prepublicación, como BioRxiv y MedRxiv, lo que permite el intercambio de información e ideas al instante. De la noche a la mañana, las prácticas de publicación académica han cambiado. La COVID-19 también ha trastocado los cimientos de la investigación básica.

para algunos enfermos tiene la confluencia de esta afectación con la extravasación desde los vasos sanguíneos.

La implicación de la bradicinina en la COVID-19 no se ha confirmado aún, pero a pesar de que su medición directa sigue siendo difícil, los éxitos incipientes de un estudio exploratorio con el icatibant, inhibidor de un receptor de la bradicinina, respaldan la hipótesis de que bajar la concentración de este péptido aliviaría los casos graves.

TRAMPAS MICROBIANAS DEFECTUOSAS

La bradicinina también aparece en otra vía inflamatoria de la sangre de los enfermos, pues su síntesis se activaría con los neutrófilos, encargados de fagocitar los patógenos. Diferentes laboratorios, entre ellos el nuestro, hemos encontrado una enorme acumulación de neutrófilos en la sangre de algunos pacientes. La gran cantidad de citocina IL-8 que circula por la sangre con la COVID-19 atrae estas células hacia los focos de la infección, como los pulmones, y contribuye a que se vuelvan abundantes. Resulta clave la detección de esta elevación de los neutrófilos el primer día de hospitalización, pues predice de manera fiable el traslado a la UCI. Algunos artículos recientes los señalan como uno de los posibles culpables del cuadro de la COVID-19, por emitir las llamadas trampas extracelulares tendidas por los neutrófilos (TEN). Se trata de mallas de ADN, proteínas antimicrobianas y enzimas que aíslan y destruyen los patógenos, pero que, por desgracia, también dañarían el tejido.

En las muestras de autopsias pulmonares, Moritz Leppkes y sus colaboradores de la Universidad Friedrich-Alexander de Alemania han descubierto obstrucciones sorprendentes en los capilares sanguíneos por la agregación de las TEN. También han observado TEN en los vasos de muestras de hígado y ri-

ñón. Además de la obstrucción, las TEN degradan las proteínas anticoagulantes, lo que contribuye a la multiplicación de los coágulos en los casos graves. Reconociendo la posible implicación de estos agregados, la Universidad McGill ha anunciado un estudio piloto de un fármaco contra la fibrosis quística que desprende el ADN de los TEN.

Todos estos estudios han puesto de manifiesto que el SARS-CoV-2 dirige el sistema inmunitario contra sí mismo. Pero no solo las defensas innatas circulan sin control; el sistema inmunitario adaptativo también queda alterado. Una de las diferencias más evidentes entre la sangre de algunos pacientes con COVID-19 y las personas sanas es la acusada linfocitopenia, en concreto la escasez de linfocitos T, componentes clave de la inmunidad adaptativa a largo plazo. Se ha visto que el comportamiento de los linfocitos T de los enfermos moderados difiere del de los graves: los linfocitos que son específicos de un invasor, o antígeno, se acumulan normalmente como medida protectora, pero no ocurre así en los más enfermos.

Hay dos tipos de linfocitos T: unos eliminan sin demora las células infectadas por el virus y otros solo actúan contra cualquier invasor una vez que reciben la señal de las citocinas. Al igual que en otras infecciones respiratorias, se ha observado que los hospitalizados con COVID-19 pierden ambos, si bien persiste un pequeño remanente durante largo tiempo, hasta semanas en algunos casos. Gracias al estudio de otros virus respiratorios, sabemos que los linfocitos T abandonan la sangre para acantonarse en los tejidos infectados. Los infectados por estos virus elevan las concentraciones de las quimiocinas que guían a los linfocitos T hasta los focos infecciosos, como la CXCL9 y la CXCL10. En cambio, aunque la sangre de los pacientes con COVID-19 contiene multitud de quimiocinas, no observamos una abundancia parecida de linfocitos T. Diversos estudios se han centrado en los pulmones de los pacientes con cuadros graves de COVID-19 porque es ahí donde se aloja el virus. Con un método de secuenciación de nucleótidos denominado scRNA-seq (sigla en inglés para secuenciación del ARN de una única célula) se han identificado varios subconjuntos de células inmunitarias, entre ellas un conglomerado considerable de linfocitos T. Pero este hallazgo no aportó ninguna explicación completa. Ni estos experimentos con pulmones ni los estudios de autopsia de numerosos órganos explicaron la escasez de linfocitos T en la sangre. Es probable que la ausencia obedezca simplemente a su muerte y, de hecho, los datos de muchos grupos de investigación respaldan esta conclusión.

¿Cómo desaparecen entonces los linfocitos T? Muchos de ellos presentan un receptor que indica su propensión a la desaparición precoz en los pacientes con COVID-19. Otra posibilidad es que la médula ósea no pueda fabricar suficientes células precursoras que se diferencien en linfocitos T, por lo que escasearían entre las células maduras. Los estudios sobre el envejecimiento y otras enfermedades han demostrado sin lugar a duda que las citocinas modulan la producción de linfocitos T en la médula ósea. Pero a pesar de que en la COVID-19 aparecen las mismas citocinas inflamatorias, queda por confirmar que exista una conexión parecida. Por último, podría suceder que sea el propio virus quien acabe con ellos. Contrastar estas hipótesis nos indicaría con qué tratamientos se aumentarían sus efectivos.

Muchas de las graves manifestaciones inmunitarias de la COVID-19 aparecen en otras infecciones respiratorias víricas (elevación drástica de las citocinas, infiltración de células inflamatorias en los pulmones, TEN y disminución de los glóbulos blancos). El SARS-CoV-2 trae consigo sus propios desafíos, sobre todo una diseminación nunca vista durante la fase presintomática y entre las personas que no presentan síntoma alguno.

El SARS-CoV, responsable de la epidemia del 2003, alcanza el máximo de multiplicación relativamente tarde, a los 10 días de la aparición de los síntomas. El MERS-CoV llega a ese punto entre el 7.º y el 10.º día. El SARS-CoV-2 solo tarda de 3 a 5 días. Esa precocidad del pico significa que antes de que aparezcan los síntomas, lo que en la mayoría de la gente sucede cuatro o cinco días después del contagio, el infectado ya libera gran cantidad de partículas víricas. Es decir, disemina el virus por doquier antes de sentir el más leve picor de garganta.

La afectación de tantísimos órganos en los síntomas de la COVID-19 también parece un rasgo único entre los virus respiratorios. El SARS-CoV-2 ocasiona anosmia, obnubilación, problemas digestivos, coágulos sanguíneos, problemas cardiovasculares e incluso sabañones covídicos. También infecta las neuronas del cerebro. En los recuperados, las lesiones tisulares persisten meses. Todo esto no suscita tanta sorpresa si caemos en la cuenta de que los tres tipos de células que forman los vasos sanguíneos (endoteliales, pericitos y miocitos lisos vasculares) envuelven todos los tejidos y están salpicados de receptores ACE2. Y como este receptor es la puerta de entrada del SARS-CoV-2 a la célula, dichos tejidos constituirían una especie de alfombra roja. Para empeorar más las cosas, las tormentas de citocinas y de bradicinina dañan los tejidos que estas células forman.

A pesar de que su antecesor, el SARS-CoV, se sirve del mismo receptor y provoca tormentas de citocinas y SDRA, parecen ser raras las lesiones extrapulmonares graves, similares a las de la COVID-19. El 80 por ciento del genoma de ambos virus es casi idéntico, por lo que cabe sospechar que el 20 por ciento restante es el responsable de las diferencias. Otra explicación más simple sería que el SARS-CoV-2 ha infectado a muchas más personas que su predecesor (6700 veces más, de momento), y lo ha hecho ante los ojos de la comunidad científica.

Los últimos nueve meses de descubrimientos e innovación dan testimonio del compromiso y la entrega de los científicos y los profesionales sanitarios. Nunca han estado más unidos por un fin común, y nunca antes la traslación desde el laboratorio hasta el paciente había sido tan rápida como hoy. Este legado pervivirá pese a los éxitos o los fracasos de los cientos de ensayos que buscan un tratamiento contra la COVID-19. Las innovaciones permanecerán para luchar contra las pandemias futuras. IyC

PARA SABER MÁS

COVID-19: The vasculature unleashed. Laure-Anne Teuwen et al. en *Nature Reviews Immunology*, vol. 20, págs. 389-391, mayo de 2020.
Lymphopenia in severe coronavirus disease-2019 (COVID-19): Systematic review and meta-analysis. Ian Huang y Raymond Pranata en *Journal of Intensive Care*, vol. 8, artículo n.º 36, mayo de 2020.
Single-cell landscape of immunological responses in patients with COVID-19. Ji-Yuan Zhang et al. en *Nature Immunology*, vol. 21, págs. 1107-1118, agosto de 2020.
Vascular occlusion by neutrophil extracellular traps in COVID-19. Moritz Leppkes et al. en *EBioMedicine*, vol. 58, artículo n.º 102925, agosto de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Por qué la COVID-19 resulta a veces mortal? Heidi Ledford en *IyC*, abril de 2020.
La difícil búsqueda de fármacos contra la COVID-19. Sara Reardon en *IyC*, noviembre de 2020.
Del sida a la COVID-19. William A. Haseltine en *IyC*, diciembre de 2020.



EN LA REGIÓN MEDITERRÁNEA numerosas especies de mariposas se hallan en regresión. Es el caso del manto púrpura (*Lycaena alciphron; en la imagen*), una especie que en España está principalmente restringida a los sistemas montañosos.

ECOLOGÍA

El declive de las mariposas mediterráneas

Los programas de ciencia ciudadana han detectado una disminución preocupante de las poblaciones de estos insectos en las tres últimas décadas. ¿Cuáles son las causas de esta pérdida?

Constantí Stefanescu

EN SÍNTESIS

Los programas de seguimiento de las mariposas, con la participación de ciudadanos voluntarios, ofrecen información valiosa sobre la dinámica de estos insectos.

Los datos revelan una disminución preocupante de sus poblaciones y la extinción local de varias especies en las tres últimas décadas.

La transformación del paisaje y el cambio climático son las principales causas de ese declive, que es especialmente acusado en la región mediterránea.

No todas las especies responden del mismo modo a las alteraciones ambientales. Profundizar en ese conocimiento resulta esencial para prever las repercusiones en la salud de los ecosistemas.

Constantí Stefanescu es coordinador científico del Programa Catalán de Seguimiento de Mariposas (CBMS, por sus siglas en inglés), del Museo de Ciencias Naturales de Granollers, en Barcelona.



CUANDO EN PLENO TRABAJO DE CAMPO, CON EL CAZAMARIPOSAS EN LA MANO y concentrados en apuntar los nombres de las especies que van apareciendo en nuestro recorrido, nos encontramos con alguna persona mayor, lo más habitual es que se dirija a nosotros y nos pregunte qué estamos haciendo. Y, después de responderle, a menudo nos comenta que cuando era joven veía muchas más mariposas que ahora. Esta misma percepción fue lo que, hace más de cuatro décadas, llevó a un grupo de entomólogos y ecólogos ingleses a desarrollar un método científico que les permitiese responder a la pregunta: ¿están realmente disminuyendo las poblaciones de mariposas? Y, si es así, ¿cuáles son las causas de este declive?

Entre esos científicos destacaba un joven llamado Ernest Pollard, quien concibió los ahora famosos *Pollard walks*, unos recorridos realizados en distintas zonas y repetidos de forma periódica para estimar la abundancia de las mariposas. A partir de ellos nacieron los programas de seguimiento de mariposas (*butterfly monitoring schemes*, o BMS), que han dado lugar a una de las iniciativas pioneras de ciencia ciudadana con más proyección a escala mundial y con más producción científica en el campo de la ecología y la biología de la conservación.

En los últimos años han aparecido un gran número de trabajos que retoman la cuestión clave de si las poblaciones de mariposas (así como de otros insectos) están colapsando y la amplían al análisis de las causas y las consecuencias que ello puede conllevar.

Con la enorme cantidad de observaciones que se han acumulado en el marco de los programas BMS, las pruebas de un declive sin precedentes son ya incuestionables. Paralelamente, las mariposas se han ido consolidando como modelo de organismo bioindicador y, por tanto, al estudiarlas también obtenemos información del estado general del ecosistema y de qué manera se ve afectado por los cambios en el entorno.

Actualmente, no solo es posible afirmar que las fuertes regresiones observadas en el centro y el norte de Europa son también aplicables a nuestra región mediterránea, sino que tenemos la capacidad de cuantificar en qué medida fenómenos como el cambio climático y la transformación del paisaje son los responsables de dichas tendencias.

CIUDADANOS CIENTÍFICOS

Antes de entrar en detalle sobre la situación de las mariposas en la región mediterránea y en el conjunto de Europa, es interesante conocer la metodología utilizada en los BMS. Estos consisten en una red de estaciones de muestreo distribuidas en un amplio marco geográfico, en cada una de las cuales se define un itinerario fijo de entre uno y dos kilómetros. El itinerario, también denominado transecto, se recorre periódicamente para censar las mariposas que se observan dentro de una banda imaginaria de cinco metros de anchura. Se registran las especies que aparecen y el número de ejemplares de cada una de ellas.

Como ocurre de forma habitual en muchas áreas de la ciencia y, muy particularmente, en el ámbito de la historia natural, los países anglosajones han liderado las investigaciones sobre las mariposas gracias a los programas BMS, iniciados en los años 70. A comienzos de los años 90, en Cataluña se instauró también uno, conocido como Catalan BMS, o CBMS. Durante casi tres décadas ha ido creciendo y se ha convertido en uno de los proyectos de ciencia ciudadana más sólidos de la región mediterránea. Hoy dispone de una extensísima base de datos que permite explorar con rigor las tendencias de las poblaciones de mariposas e identificar los factores que más inciden sobre ellas en nuestra región.

En el caso del CBMS, los censos se repiten semanalmente, desde la primera semana de marzo hasta la última de septiembre, siempre y cuando las condiciones meteorológicas no impidan la actividad de las mariposas. Al final de la temporada, los recuentos semanales se utilizan para calcular un índice de abundancia relativa, que informa del nivel poblacional (número de individuos) de la especie y que permite conocer su evolución a largo plazo a medida que se acumulan los datos de varios años. Mediante técnicas estadísticas, se agregan los datos de varias estaciones de muestreo y se determina la tendencia de las distintas especies. Los criterios de agregación se pueden hacer, por ejemplo, definiendo regiones climáticas homogéneas para detectar la influencia del clima en las poblaciones de mariposas. Además, las rutas de censo se segmentan en secciones que se corresponden con unidades de paisaje diferenciadas (como un prado, un bosque, una maquia, un campo de cultivo, etcétera), lo cual permite analizar las preferencias de hábitat de las distintas especies y el estado de conservación de dichos hábitats en el conjunto del territorio estudiado.

Actualmente, el CBMS cuenta con más de 250 participantes que han acumulado ya casi 50.000 horas de muestreo y que han recorrido casi 70.000 kilómetros censando mariposas en 180 localidades repartidas por Cataluña, las islas Baleares y Andorra (donde existe una red propia, el BMSAnd, que se gestiona conjuntamente con la del CBMS). En los 27 años de vida del proyecto se han contado cerca de 3 millones de mariposas pertenecientes a 188 especies (un 93 por ciento de todas las

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DARKDIAMOND67/ISTOCK

conocidas en Cataluña). A esta base de datos hay que añadir actualmente las que proporciona el BMS España, activo desde 2014, y el BMS gestionado por la asociación Zerynthia, que desde 2008 se centra principalmente en el País Vasco y Navarra. A nivel europeo, el conjunto de programas BMS se coordina a través del BMS de Europa (eBMS), para producir indicadores que reflejen la situación continental.

Como ya se ha comentado, la mayoría de los participantes en los BMS son voluntarios que aportan su esfuerzo y conocimientos de forma desinteresada y entusiasta. De hecho, muchos de ellos esperan ansiosamente ese momento semanal en el que pueden salir al campo, contactar con la naturaleza y recoger unos datos que después generarán un conocimiento científico de primer nivel y con aplicaciones en la conservación de la biodiversidad. La clave del éxito de los BMS es, sin lugar a dudas, el irresistible atractivo de las propias mariposas, que han fascinado a los humanos desde tiempos inmemoriales por su belleza. También han ayudado la facilidad con que pueden identificarse la mayoría de las especies y la metodología de muestreo empleada, sencilla y agradable. Es difícil imaginar que proyectos similares puedan desarrollarse con otros grupos de insectos cuyo estudio es mucho más complejo y exigente. Es por ello que en muchas ocasiones se ha considerado a las mariposas como el equivalente de las aves en el mundo de los insectos, teniendo en cuenta la atracción y la pasión que las aves también despiertan entre los naturalistas y la gran cantidad de voluntarios que participan en programas de seguimiento en este grupo de vertebrados [*véase* «Ornitología participativa», por Hillary Rosner; Investigación y Ciencia, junio de 2013].



EL CENSO SEMANAL de las mariposas que van apareciendo en itinerarios fijos repartidos por distintas zonas geográficas ha resultado fundamental para observar su evolución a lo largo de los años. La recopilación de los datos ha sido realizada por ciudadanos voluntarios. En la imagen, voluntaria del CBMS en la sierra del Montnegre (Barcelona).

JORDI JUBANY

MARIPOSAS DE PRADOS, MATORRALES Y BOSQUES

¿Qué nos permiten concluir los datos obtenidos hasta la fecha por los BMS en el conjunto de Europa? Una buena medida de la situación actual nos la proporciona el indicador de las mariposas de prados, uno de los parámetros que ha sido adoptado por la Comunidad Europea para evaluar el estado de la biodiversidad. Este indicador sintetiza las tendencias en las poblaciones de 17 especies de mariposas comunes y típicas de prados en un conjunto de 16 países europeos. Se trata de un porcentaje que expresa la abundancia de las especies en un momento dado con respecto a la que había al inicio del censo. En un período de 28 años (entre 1990 y 2017) se ha observado que ha disminuido un 39 por ciento, con caídas especialmente notables entre 1990 y 1998 y entre 2002 y 2012. Este primer resultado ya nos muestra el declive generalizado y preocupante de las mariposas de los prados europeos en las tres últimas décadas.

¿Hasta qué punto estos resultados son aplicables a la región mediterránea? El CBMS también genera indicadores de biodiversidad propios, entre los cuales destacan los correspondientes a distintos hábitats, como prados, matorrales y bosques. Nuestros datos indican que, en los últimos 25 años (entre 1995 y 2019), las 13 especies de mariposas de prados más típicas de nuestra región (Cataluña, Baleares y Andorra) han experimentado un descenso del 71 por ciento. Es decir, la problemática detectada a nivel europeo es aquí incluso más alarmante. También confirma las sospechas que muchas personas tenían al pasear por el campo, según comentábamos al principio.

Los indicadores correspondientes a otros hábitats dibujan una imagen más precisa de la situación. En el caso de las mariposas de matorrales, se observa una tendencia casi exacta a la de los prados. Pero no sucede así con las especies generalistas (capaces de ocupar ambientes muy diversos), que también han disminuido pero solo un 13 por ciento; ni tampoco con las especies forestales, que se han mantenido estables durante el mismo período. Estas diferencias se relacionan, por una parte, con la evolución de los usos del suelo en las últimas décadas y, por otra, con la propia ecología de las especies.

En efecto, en la zona mediterránea, el abandono del pastoreo tradicional está comportando una enorme pérdida de espacios abiertos, como herbazales y distintos tipos de prados. Y los paisajes agrícolas, que han caracterizado nuestra región durante siglos y que constituían uno de los valores culturales y ecológicos más preciados, han sido sustituidos por otros mucho más uniformes y, sobre todo, más boscosos.

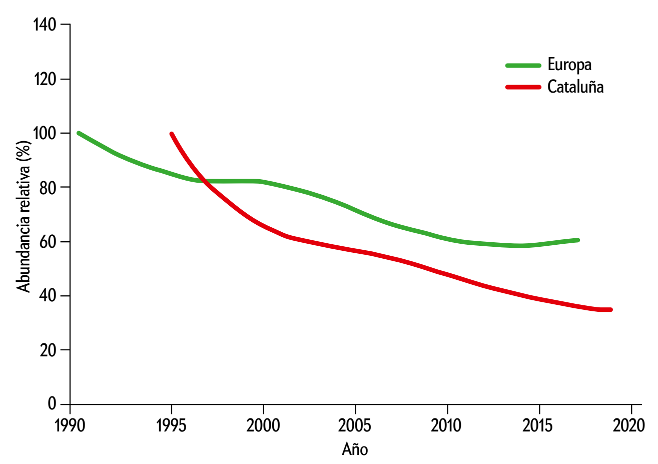
Este proceso todavía sigue vivo, según revelan nuestras estimaciones de la cobertura forestal en las zonas muestreadas, con un aumento progresivo en los últimos 25 años. Y también lo indican las comunidades de mariposas. En un estudio reciente, hemos comprobado que el 70 por ciento de las más de 50 comunidades de mariposas monitorizadas en un período de entre 10 y 25 años han mostrado una tendencia a estar más dominadas por las especies que prefieren los ambientes cerrados de los bosques. De hecho, hemos detectado un paralelismo casi perfecto entre los cambios en las comunidades de mariposas y en las vegetales, ambas cada vez más dominadas por especies forestales.

Esa tendencia resulta preocupante desde el punto de vista de la conservación, ya que supone una pérdida de biodiversidad. Ello se debe principalmente al hecho de que hasta un 90 por ciento de nuestras especies de mariposas prefieren los ambientes abiertos, donde hallamos las comunidades más diversas. El abandono de los prados y los procesos de sucesión vegetal (que conducen al desarrollo de bosques) no solo explican una parte importante del declive que sufren muchas especies de mariposas, sino que han provocado la extinción local de casi un 5 por ciento de sus poblaciones. Este problema es, por tanto, de primer orden y tendría que figurar entre las prioridades en la agenda de los gestores de la biodiversidad de nuestro país.

HÁBITATS MÁS PEQUEÑOS Y FRAGMENTADOS

Pero la modificación actual del paisaje incluye otros aspectos con efectos negativos sobre numerosos organismos. Uno de ellos es la sustitución de la agricultura tradicional por la intensiva, que ha pasado a dominar en poco más de cincuenta años una gran parte de las zonas agrícolas de nuestro país. La agricultura intensiva prima la producción a costa de ser mucho menos respetuosa con el entorno. Los plaguicidas (herbicidas e insecticidas), los abonos, la destrucción de los márgenes de los cultivos, el mayor tamaño de los campos y el uso de maquinaria pesada, así como la tendencia al monocultivo, son factores que han convertido los paisajes agrícolas en extensiones homogéneas, hostiles para la mayoría de los organismos. Por otra parte, las áreas más humanizadas han experimentado cambios aún más drásticos, como la urbanización y la construcción de infraestructuras viarias, y han ido ganando terreno a las zonas rurales.

En conjunto, estas transformaciones están provocando no solo la destrucción de numerosos hábitats, sino también la fragmentación y la reducción del tamaño de los que todavía persisten. Las repercusiones de este fenómeno sobre las mariposas varían mucho en función de la ecología de las distintas especies, según han demostrado nuestros análisis. Los efectos son muy importantes en aquellas que en ecología se denominan «especialistas de hábitat», las cuales requieren unas condiciones muy concretas para subsistir. Estas especies se estructuran típicamente en metapoblaciones, es decir, en poblaciones asociadas a fragmentos de hábitat bien delimitados y conectadas entre sí gracias a procesos de dispersión. Dichos procesos son cruciales porque permiten compensar con nuevas colonizaciones los fenómenos de extinción local que puedan producirse por causas naturales (sequías, impactos de depredadores, cambios en la vegetación...). Además, gracias a que constituyen un sistema muy dinámico espacial y temporalmente, permiten asegurar la persistencia de la especie en un determinado paisaje. Sin embargo, la reducción y la fragmentación del hábitat conllevan dos fenómenos que perjudican particularmente a las mariposas especialistas: por una parte, implican un mayor riesgo de extinción local, ya que un fragmento reducido debe albergar una población más pequeña y, por tanto, con más posibilidades de colapsar; y por otra parte, disminuyen las posibilidades de éxito de los procesos de colonización, ya que muchas especies tienen una escasa capacidad dispersiva y no pueden superar las crecientes distancias que separan los fragmentos de hábitat vacantes. [*Véase* «¿Cómo influye la pérdida de hábitat en la extinción de especies?», por Joaquín Hortal y Ana M. C. Santos; Investigación y Ciencia, febrero de 2021.]



LAS MARIPOSAS TÍPICAS DE LOS PRADOS, el ambiente preferido por la mayoría de las especies, han disminuido notablemente sus poblaciones con respecto a las que había al inicio de los censos, en los años 90. El fenómeno se ha observado en el conjunto de Europa (*verde*) y ha sido aún más acusado en Cataluña (*rojo*).

DATOS: «THE EU BUTTERFLY INDICATOR FOR GRASSLAND SPECIES: 1990-2017: TECHNICAL REPORT». C. A. M. VAN SWAAY ET AL., BUTTERFLY CONSERVATION EUROPE & ABLE/EBMS, 2019 Y CBMS.

De este modo, la transformación del paisaje perjudica mucho más a las especies especialistas de hábitat que a las generalistas, las cuales pueden ocupar ambientes mucho más diversos y, en general, tienen una mayor capacidad dispersiva. Esto se refleja en los indicadores de abundancia que hemos calculado: su disminución es mucho más acusada en las especialistas de prados y matorrales que en las generalistas.

La influencia de la ecología de las especies en el destino de sus poblaciones ha sido descrita también en muchos otros organismos. Se trata de un fenómeno conocido como homogenización de la fauna y de la flora y es una de las consecuencias más típicas del cambio global. Evidentemente, conlleva una pérdida de biodiversidad y una simplificación estructural de los ecosistemas, con repercusiones en su funcionamiento. Un ejemplo destacable es la pérdida en la capacidad polinizadora de las comunidades de insectos como consecuencia de su menor diversidad. Ello se debe a que las distintas especies de insectos se complementan en su rol polinizador según la morfología y el comportamiento que presentan. [*Véase* «El valor de los polinizadores», por Leonardo Galetto, Lucas A. Garibaldi y Marcelo A. Aizen; Investigación y Ciencia, agosto de 2018.]

CAMBIO CLIMÁTICO Y DEUDA TÉRMICA

Otro componente del cambio global con efectos crecientes sobre las mariposas es el cambio climático. Cuando se iniciaron los censos sistemáticos de mariposas en las décadas de los 70 y 80, los responsables de los programas BMS poco podían imaginar que las bases de datos que se estaban generando constituirían un material único para evaluar cómo se vería afectada la biodiversidad por un clima cada vez más cálido.

A finales de los 90, la ecóloga Camille Parmesan, por entonces en el Centro Nacional de Análisis y Síntesis Ecológicos de la Universidad de California en Santa Barbara, puso a las mariposas en el punto de mira de las repercusiones del cambio climático con la publicación de dos artículos en la revista *Nature*. En el primero, Parmesan demostró que el área de distribución de la mariposa *Euphydryas editha* en el continente americano había sufrido un desplazamiento neto hacia el norte y hacia altitudes más elevadas durante el último siglo. Documentó la distribución antigua de la especie a partir de la revisión de numerosas colecciones entomológicas depositadas en museos, y después revisitó los lugares donde vivía la mariposa para comprobar si todavía persistía. Los datos revelaron una tendencia muy clara: las poblaciones de las latitudes más bajas tenían tasas de extinción muy superiores a las de las latitudes más altas, igual que sucedía en las poblaciones de tierras bajas con respecto a las de zonas de montaña. Estas extinciones desiguales no guardaban ninguna relación con la destrucción o modificación de los hábitats, y Parmesan las interpretó como una consecuencia directa del calentamiento del clima. En un segundo trabajo, la experta siguió un enfoque similar para estudiar la distribución de 35 especies de mariposas no migradoras del continente europeo a lo largo del siglo xx. Junto con un equipo de entomólogos y ecólogos de seis países europeos, describieron también que la mayoría de las especies habían alterado su distribución. Los desplazamientos observados hacia el norte, de entre 35 y 240 kilómetros, concordaban con el



LAS MARIPOSAS ESTÁN CAMBIANDO: Las poblaciones de la blanca del majuelo (*Aporia crataegi*) (*1*), una especie típica de montaña, están desapareciendo a causa del calentamiento global. La macaón (*Papilio machaon*) (*2*), una mariposa muy común y una de las más espectaculares, ha sufrido en Cataluña una regresión apreciable en las tres últimas décadas. La cleopatra (*Gonepteryx cleopatra*) (*3*) es una de las pocas que se ha beneficiado por la cobertura creciente de maquias y bosques, ya que sus orugas dependen exclusivamente de un arbusto que abunda en ellos, el aladierno (*Rhamnus alaternus*). La mariposa tigre, *Danaus chrysippus* (*4*), es una especie subtropical cada vez más frecuente como visitante estival en el norte peninsular, lo que se ha asociado al aumento de las temperaturas.

FOTOGRAFÍAS DE ORIOL MASSANA

que habían experimentado las isotermas como consecuencia del cambio climático.

Las conclusiones de estos estudios pioneros han sido corroboradas después en otros grupos taxonómicos y áreas geográficas. El calentamiento global está modificando el clima con tal rapidez que las poblaciones de muchas especies pasan a encontrarse fuera del nicho climático al que se adaptaron a través de un largo proceso evolutivo. Para mantener su nicho, se ven obligadas a desplazarse hacia latitudes y altitudes más altas y, si no lo consiguen, aumenta su riesgo de extinción.

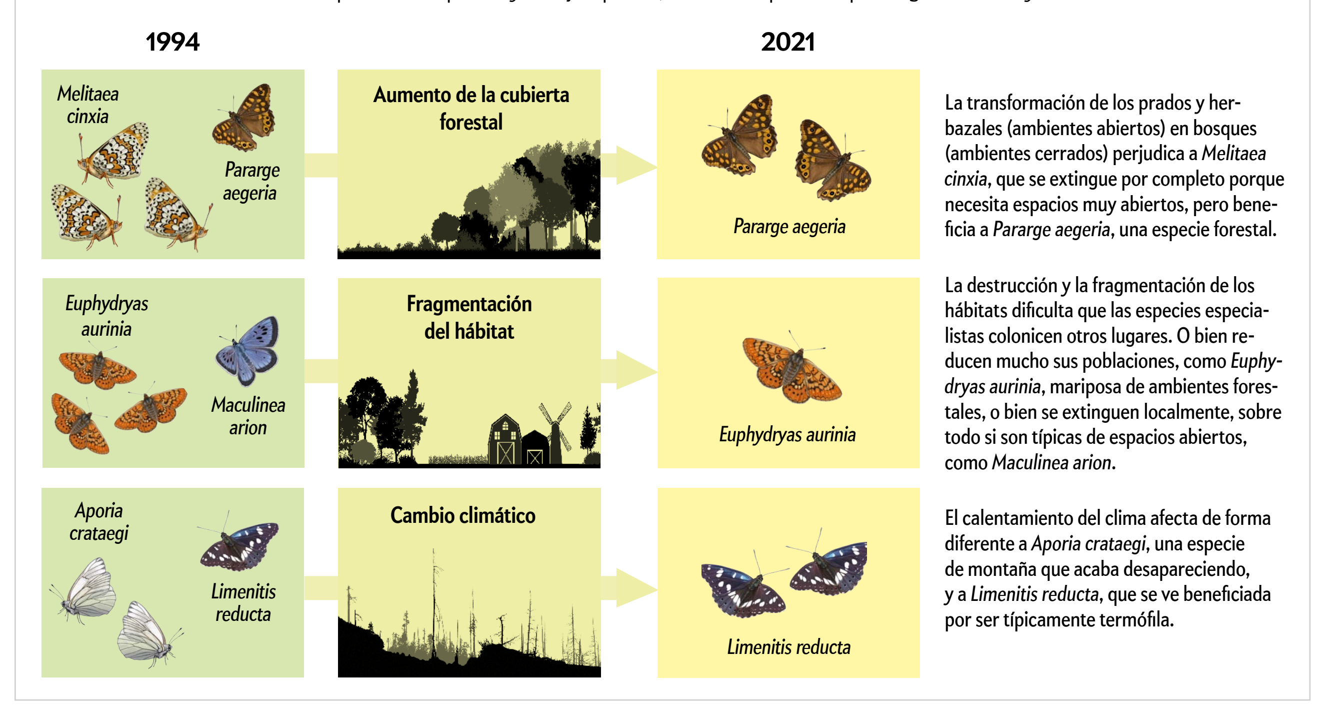
El equipo de Robert Wilson y David Gutiérrez, de la Universidad Rey Juan Carlos, ha confirmado esas tendencias en las comunidades de mariposas de la sierra de Guadarrama. De nuevo, al comparar datos históricos (de la década de los 70) con los suyos propios obtenidos a principios del siglo xxi, han constatado un ascenso en altitud de varios cientos de metros en diversas especies, el cual se corresponde perfectamente con el desplazamiento de las isotermas. Los cambios pueden consistir en una retracción del límite inferior del área de distribución, en una expansión del límite superior, o ambos fenómenos a la vez. Un buen ejemplo de retracción en la sierra lo aporta la mariposa blanca del majuelo (*Aporia crataegi*). Los investigadores han comprobado que la mortalidad de las puestas es actualmente más elevada en las poblaciones que ocupan el límite inferior, donde se supera cada vez más la temperatura máxima que puede soportar la fase de huevo. Como consecuencia, la especie ha desaparecido de las zonas bajas, donde era común en el siglo pasado, un hecho que también se ha constatado en numerosos lugares de Cataluña. Por otro lado, la expansión hacia altitudes mayores responde a un proceso de dispersión y colonización y ha sido registrada en algunas especies, tanto en la sierra de Guadarrama como en los Pirineos y el Prepirineo.

La gran amenaza que supone el cambio climático para las mariposas y otros organismos se debe a que las tasas de extinción en los hábitats que se han vuelto demasiado cálidos suelen superar las tasas de colonización de los hábitats que pasan a ser favorables. Una de las principales causas son las barreras con que se topan las especies en el momento de dispersarse, un problema creciente por la mayor fragmentación de los hábitats en los paisajes actuales, tal como se apuntaba antes.

La relación desigual entre la extinción y la colonización comporta que muchas comunidades de mariposas y de otros organismos acusen en la actualidad lo que se conoce como «deuda climática». En efecto, gracias a los programas BMS y su equivalente para el grupo de las aves, ha sido posible investigar los cambios en la composición de miles de sus comunidades en el conjunto de Europa durante los últimos veinte años. Los datos confirman que dichas comunidades están cada vez más dominadas por especies termófilas (adaptadas a climas cálidos), un proceso paralelo al ascenso de las temperaturas en las localidades estudiadas.

¿Cómo afecta el cambio global a las mariposas?

El seguimiento de las mariposas mediterráneas ha permitido observar su evolución en los últimos decenios, aunque no todas las especies se han visto alteradas del mismo modo. Cada una ha respondido de distinta forma a los cambios en el entorno en función de sus adaptaciones biológicas y su hábitat de preferencia. Ilustramos aquí, de forma simplificada, la evolución de una comunidad de partida (1994) formada por seis especies con distinta abundancia y afectada por distintos procesos del cambio global. Al final (2021), la comunidad se ha vuelto más pobre en especies y en ejemplares, dominada por mariposas generalistas y termófilas.



Para llevar a cabo estos cálculos, cada especie de mariposa o ave se caracteriza a partir de un índice térmico, que sintetiza la temperatura que experimenta la especie en toda su área de distribución. De este modo, las especies con distribuciones mediterráneas tienen índices térmicos más elevados que las del centro y norte de Europa. A continuación, para cada localidad donde se monitorizan las mariposas o aves, se calcula un índice térmico de la comunidad en función de la composición de especies y de su abundancia relativa: en las localidades mediterráneas, el índice térmico de la comunidad será más alto que en las nórdicas, porque las especies dominantes son las que tienen índices térmicos más altos. Si este cálculo se repite cada año, es posible ver cómo evoluciona en el tiempo el índice térmico de la comunidad.

Gracias a este método, Vincent Devictor, del Museo de Historia Natural de París, y un equipo compuesto por los coordinadores científicos de los programas de seguimiento europeos de mariposas y aves, comprobaron cómo, con el paso de los años, la composición de las comunidades se «calentaba», es decir, ganaban peso las especies más termófilas. Ahora bien, su trabajo reveló que tales cambios eran menores a los esperados, teniendo en cuenta el ascenso de las temperaturas desde el inicio del período de estudio. Mientras que entre 1990 y 2008 las isotermas se habían desplazado hacia el norte casi 250 kilómetros, las mariposas y las aves solo lo habían hecho 114 y 37 kilómetros, respectivamente. En otras palabras, con el paso de los años las comunidades acumulan un desajuste o deuda térmica debido a la dificultad de las especies para colonizar las áreas más septentrionales. Estos desajustes suponen un estrés adicional para las poblaciones, que sufren un mayor riesgo de extinción.

LAS MARIPOSAS APARECEN ANTES

Los proyectos BMS han permitido también documentar otra de las respuestas más comunes que muestran los organismos frente al calentamiento global: los avances fenológicos. La fenología es la ciencia que estudia la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos. Las mariposas, al ser organismos ectotérmicos (cuyo ritmo metabólico varía según la temperatura ambiental), son muy sensibles a los cambios de temperatura. Además, para poder completar cada una de las fases inmaduras (huevo, larva, crisálida) han de acumular cierta cantidad de energía, que se mide en «grados día». A temperaturas más altas, la acumulación de estas unidades energéticas es más rápida y, por tanto, las fases se completan en menos tiempo y los insectos adultos emergen antes.

La periodicidad semanal de los censos del BMS los convierte en un instrumento idóneo para definir el período de vuelo de las distintas especies de mariposas y para estudiar los cambios fenológicos que experimentan anualmente. David Roy y Tim Sparks, del Centro de Ecología e Hidrología del Reino Unido, desde donde se coordina el BMS de ese país, fueron los primeros en utilizar los datos del programa para demostrar que, desde finales de los años 70 hasta finales de los 90, la mayoría de las especies británicas habían avanzado su período de vuelo en paralelo al calentamiento del clima. En su estudio establecieron

MARTÍ FRANCH (*mariposas*); GETTY IMAGES/A-DIGIT/ISTOCK (*cambio climático*)

que un aumento de 1 grado centígrado adelantaba entre 2 y 10 días el momento en que se registraba la máxima abundancia de las especies (número de individuos por especie). Poco después, nuestro equipo confirmó el mismo efecto en una localidad catalana de la que se disponía de datos desde finales de los 80. En nuestra investigación comprobamos que, entre 1988 y 2002, 16 de las 18 especies estudiadas habían adelantado su aparición, en algunos casos hasta más de tres semanas.

En los últimos años, otros estudios han demostrado que los avances fenológicos constituyen una respuesta universal, no solo en las mariposas y otros insectos, sino también en una gran diversidad de grupos de animales y plantas. Por ejemplo, numerosas especies de aves migratorias han adelantado el momento de la primavera en el que llegan a nuestras latitudes, y muchas especies de árboles y arbustos florecen también en una época más temprana. Además, se ha observado que estas respuestas son particularmente acusadas en primavera y en las latitudes más elevadas.

El avance fenológico ayuda a las especies a conservar su nicho térmico y, por tanto, es esperable que favorezcan la supervivencia. Pero ¿es suficiente la magnitud de esta respuesta? Esta cuestión crucial ha sido el foco de una investigación reciente liderada por Viktoriia Radchuck, del Instituto Leibniz para las Investigaciones Zoológicas y Faunísticas (Leibniz-IZW), en Berlín, en la que ha colaborado un numeroso grupo de expertos (incluido nuestro equipo). El estudio confirma que los avances fenológicos son adaptativos y se asocian a un mayor éxito reproductivo de los individuos que los experimentan; pero, al mismo tiempo, demuestra que esos cambios no consiguen mantener una sincronía perfecta con los del clima y, por tanto, provocan un desajuste creciente entre dichos individuos y su óptimo climático. De este modo, nos volvemos a encontrar con una situación similar a la de la deuda climática antes mencionada, aunque en este caso es de tipo temporal, en lugar de espacial.

Además, los cambios fenológicos plantean otra problemática de enorme importancia. Se trata de los desajustes temporales que pueden producirse entre los diversos grupos de especies que conforman la red trófica de un ecosistema. Así, puede suceder que el brote de las hojas o la floración se adelanten mucho más que la emergencia de una mariposa, la cual tal vez necesite sincronizar la puesta con la aparición de esos órganos vegetales para que las larvas dispongan de un recurso nutritivo óptimo. Aunque este aspecto está todavía poco estudiado, sí se han registrado ejemplos de desajustes entre la fenología de las flores y el período de vuelo de las mariposas, muchas de cuyas especies, en la fase adulta, se alimentan exclusivamente de néctar. [*Véase* «Pérdida de sincronía en los ecosistemas», por Daniel Grossman; Investigación y Ciencia, marzo de 2004.]

Uno de los pocos análisis sobre este tipo de efectos ha sido llevado a cabo con datos del CBMS. Nuestros resultados revelan que el grado de sincronía entre flores y mariposas disminuye notablemente los años con sequías severas. Las mariposas solventan en parte el problema aprovechando una amplia variedad de flores, es decir, adoptan una estrategia generalista desde un punto de vista de la alimentación. Sin embargo, en muchas especies de mariposas el grado de especialización trófico de las larvas es altísimo y, si se pierde la sincronía, simplemente no tienen la posibilidad de cambiar de recurso nutritivo.

FUTUROS RETOS EN UN MUNDO CAMBIANTE

Si recapitulamos sobre el estado actual de las mariposas, vemos cómo un conjunto creciente de datos indican que la mayoría de las especies se hallan actualmente en declive. En nuestra región mediterránea, alrededor de un 70 por ciento de las especies están experimentando una regresión y, en según qué hábitats, las poblaciones han disminuido de forma alarmante, hasta alcanzar abundancias muy por debajo de la mitad de las que registrábamos hace escasamente tres décadas. La situación es consecuencia del conjunto de los factores que comporta el cambio global. Las transformaciones recientes en los usos del suelo están teniendo un impacto negativo importante. Destacan fenómenos como el aumento de la cobertura forestal debido al abandono de la agricultura y el pastoreo tradicionales, la intensificación de la agricultura y la destrucción y la fragmentación de los hábitats. El cambio climático, con el ascenso de las temperaturas y el aumento de las sequías, supondrá una presión añadida para las mariposas en los próximos años, en especial en la región mediterránea. De hecho, los estudios apuntan a este factor como una de las causas directas de algunas de las regresiones observadas.

Sin embargo, todavía hay lagunas importantes en el conocimiento sobre el efecto del cambio global en las poblaciones de mariposas. Las futuras investigaciones tendrían que centrarse en los aspectos todavía poco entendidos, como la pérdida de sincronía entre los distintos componentes de las redes tróficas y sus efectos en el funcionamiento de los ecosistemas. Las mariposas ocupan una posición clave dentro de las redes tróficas. No solo ejercen un papel de primer orden como herbívoros, sino también como polinizadores, y además sirven de alimento a muchas otras especies de invertebrados y vertebrados. La disminución y el colapso de sus poblaciones comportarán desequilibrios importantes, con consecuencias negativas también para nosotros. Una muy evidente es la disminución del servicio ecosistémico de la polinización. Pero también cabe esperar que los efectos se propaguen por la red trófica y afecten a otros grupos, como las aves insectívoras, lo cual, a su vez, podría favorecer la proliferación de plagas de insectos.

Hay todavía muchos interrogantes sobre qué conllevará un mundo con menos mariposas, pero las perspectivas no son buenas. Nuestro deber como investigadores es aportar datos fiables sobre todos estos procesos y poder interpretarlos para entender mejor sus repercusiones en un mundo cambiante. IyC

PARA SABER MÁS

Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. C. Stefanescu, J. Peñuelas y Iolanda Filella en *Global Change Biology*, vol. 9, págs. 1494-1506, octubre de 2003.
Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. Vincent Devictor, et al. en *Nature Climate Change*, vol. 2, págs. 121-124, enero de 2012.
General declines in Mediterranean butterflies over the last two decades are modulated by species traits. Yolanda Melero, Constantí Stefanescu y Joan Pino en *Biological Conservation*, vol. 201, págs. 336-342, septiembre de 2016.
Adaptive responses of animals to climate change are most likely insufficient. Viktoriia Radchuk, et al. en *Nature Communications*, vol. 10, artículo n.° 3109, julio de 2019.
Vegetation encroachment drives changes in the composition of butterfly assemblages and species loss in Mediterranean ecosystems. Andreu Ubach, et al. en *Insect Conservation and Diversity*, vol. 13, págs. 151-161, marzo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El vuelo transcontinental de una mariposa. Constantí Stefanescu y Oriol Massana en *IyC*, abril de 2017.
¿Qué está matando a la mariposa monarca? Gabriel Popkin en *IyC*, mayo de 2020.

por Leslie Nemo

El arte caleidoscópico de los corales

Un proyecto multimedia une ciencia y arte para mostrar al público la biodiversidad y las adaptaciones de estos organismos

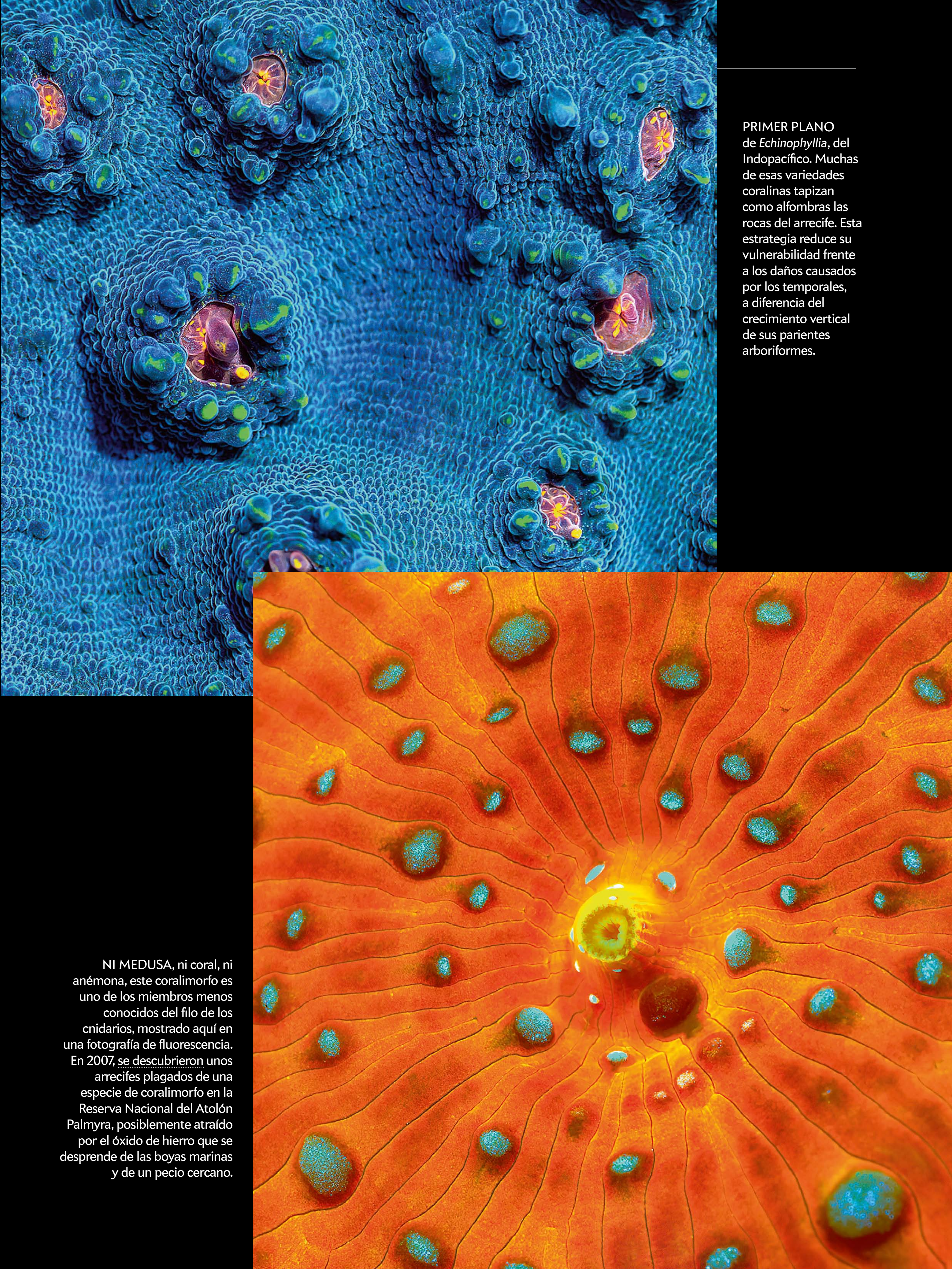
Bajo las aguas cercanas a Miami, los arrecifes de coral ofrecen un espectáculo de neón que rivaliza con el colorido y brillo de la ciudad. Dar a conocer al gran público esas semejanzas es el propósito del dúo artístico y científico Coral Morphologic. El músico J. D. McKay y el biólogo marino Colin Foord colaboran y usan filmaciones de corales originarios de Florida y otras partes del mundo en montajes artísticos y multimedia. Pretenden contribuir así a que los espectadores aprecien y defiendan este ecosistema submarino vital. El brillante trabajo, con imágenes de pólipos de tonos rojos y verdes fluorescentes, no se ha mostrado en salas de exposición, sino que se ha proyectado sobre las fachadas de edificios de Miami.

Durante los últimos años, los corales cercanos a esta ciudad han iniciado la colonización de los espigones locales, lo que se espera que sea un indicio de su resistencia a las cambiantes condiciones marinas. Estos organismos pioneros «podrían tener la clave del modo en que los arrecifes del planeta intentarán adaptarse a la influencia humana en el siglo xxi», afirman McKay y Foord. Si el coral es capaz de prosperar de algún modo en el alterable litoral de Miami, ¿podría apañárselas para sobrevivir en otros lugares?

—Leslie Nemo



LOS LLAMATIVOS COLORES DE LOS CORALES, como este del género *Pectinia*, del Indopacífico, son tan alegres como funcionales. En las aguas poco profundas, los pigmentos protegen las algas que viven en el seno del coral contra la dañina luz ultravioleta, mientras que, a mayor profundidad, en mar abierto, la fluorescencia les proporciona la cantidad de luz necesaria para completar la fotosíntesis.



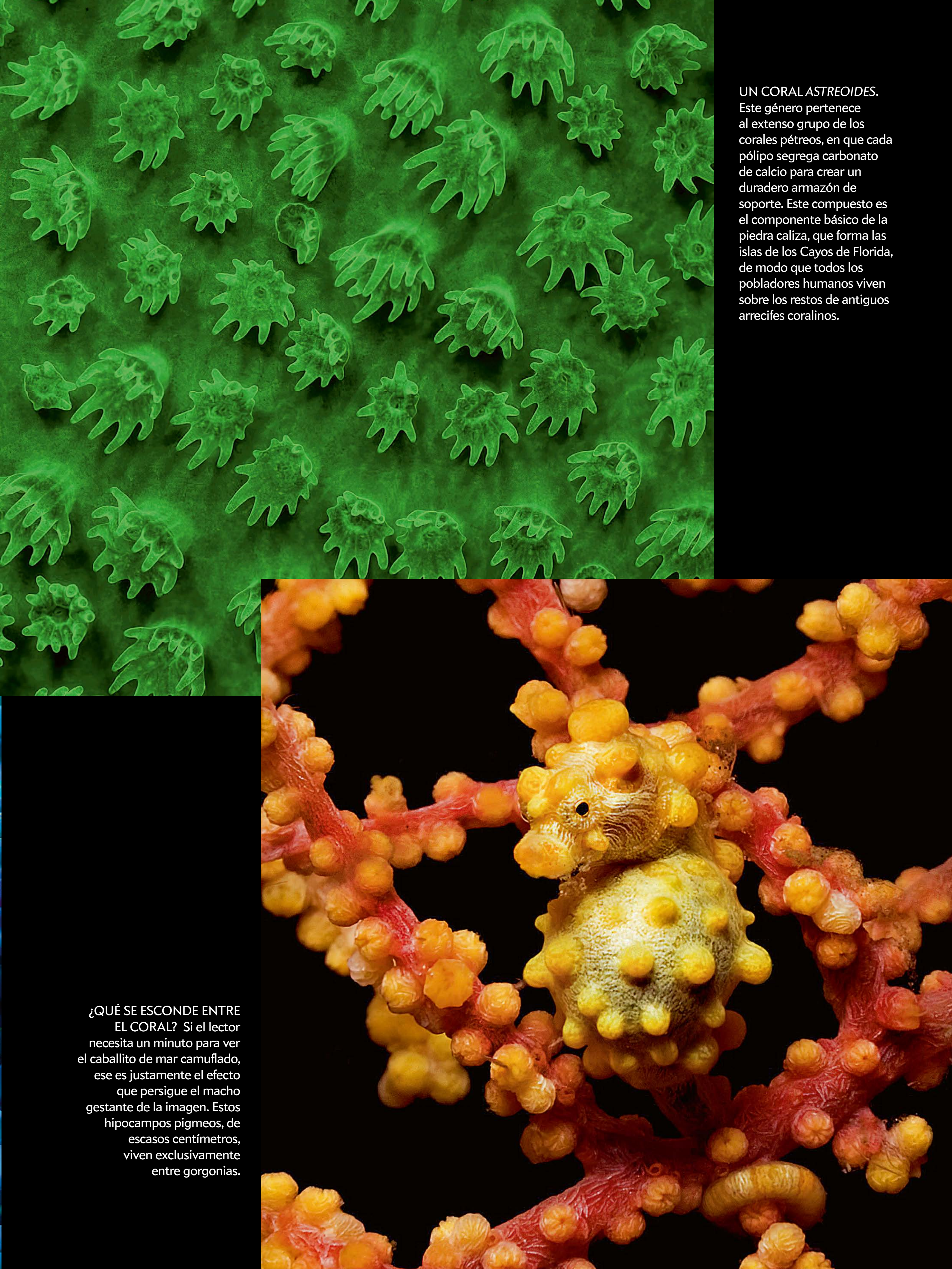
PRIMER PLANO de *Echinophyllia*, del Indopacífico. Muchas de esas variedades coralinas tapizan como alfombras las rocas del arrecife. Esta estrategia reduce su vulnerabilidad frente a los daños causados por los temporales, a diferencia del crecimiento vertical de sus parientes arboriformes.

NI MEDUSA, ni coral, ni anémona, este coralimorfo es uno de los miembros menos conocidos del filo de los cnidarios, mostrado aquí en una fotografía de fluorescencia. En 2007, se descubrieron unos arrecifes plagados de una especie de coralimorfo en la Reserva Nacional del Atolón Palmyra, posiblemente atraído por el óxido de hierro que se desprende de las boyas marinas y de un pecio cercano.



EL CORALIMORFO *Ricordea florida* ha sido víctima de la recolección ilegal en Florida y Puerto Rico. Aunque son parientes cercanos de los corales, los coralimorfos no construyen su propio exoesqueleto, como hacen los primeros. Los expertos anhelan saber por qué ambos tipos de cnidarios divergieron en ese rasgo esencial.

BOCA DEL CORALIMORFO *Ricordea yuma*, habitante del Indopacífico. El alimento acaba en esta cavidad gastrovascular, que es también el equivalente del sistema excretor, donde las células digestivas vierten sus desechos.



UN CORAL *ASTREOIDES*. Este género pertenece al extenso grupo de los corales pétreos, en que cada pólipo segrega carbonato de calcio para crear un duradero armazón de soporte. Este compuesto es el componente básico de la piedra caliza, que forma las islas de los Cayos de Florida, de modo que todos los pobladores humanos viven sobre los restos de antiguos arrecifes coralinos.

¿QUÉ SE ESCONDE ENTRE EL CORAL? Si el lector necesita un minuto para ver el caballito de mar camuflado, ese es justamente el efecto que persigue el macho gestante de la imagen. Estos hipocampos pigmeos, de escasos centímetros, viven exclusivamente entre gorgonias.

por Hugo de los Campos

Hugo de los Campos es profesor de epistemología en la Universidad de la República, Uruguay.



Una solución al problema escéptico de la inducción

O cómo el pragmatismo podría salvarle la vida a un pavo

Esta es una de las viejas preguntas de la filosofía de la ciencia: ¿estamos justificados para realizar inferencias de futuro? Porque de poco nos serviría el conocimiento si no nos informara acerca de lo que sucederá la siguiente vez. Pero, ¿cómo podemos asegurar que aquello que observamos que sucede, por más precisas y numerosas que hayan sido nuestras observaciones, continuará sucediendo? El debate se ha desarrollado mayormente en las bibliotecas —en los laboratorios están ocupados por asuntos más importantes—. Aquí vamos a llevarlo a la granja.

El problema del pavo inductivista

«La nitidez de este punto es ilustrada por un ejemplo algo truculento atribuido a Bertrand Russell. Cuenta que un pavo descubrió en su primera mañana en la granja que le daban comida a las 9. Después de ver repetida la experiencia diariamente durante semanas, el pavo creyó que podía seguramente sacar la conclusión "Siempre como a las 9 de la mañana". Pero, ¡ay! se demostró de manera indudable que esta conclusión era falsa cuando, la víspera de la Navidad, en vez de darle la comida le cortaron el cuello. El razonamiento del pavo le condujo desde un número de observaciones verdaderas a una conclusión falsa, lo que indica claramente la invalidez del razonamiento desde el punto de vista lógico.»

El relato con fatal desenlace fue presentado por Alan Chalmers en la tercera edición de *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, un manual con el que decenas de promociones de aspirantes a científicos hicieron sus primeras incursiones —en muchos casos la única— al campo de la epistemología.

El cuento, en efecto, procede de Russell, pero con un pollo en lugar de un pavo como desafortunado protagonista. La historia fue relatada por el filósofo británico en su trabajo de 1912, *The problems of philosophy*. Russell concluye que «debemos distinguir el hecho de que las uniformidades pasadas causan expectativas en cuanto al futuro, de la cuestión de si existe algún motivo razonable para dar peso a tales expectativas una vez planteada la cuestión de su validez».



GETTY IMAGES/TASLIMA KHATUN/ISTOCK, MODIFICADO POR INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

El problema epistemológico al que nos referimos fue propuesto por David Hume, casi tres siglos atrás, en su *Tratado sobre la naturaleza humana* (1738). Se lo conoce, en su honor, como *el problema escéptico de la inducción de Hume*.

El razonamiento inductivo del pavo de Chalmers lo condujo a un final desafortunado. Pero ¿qué hubiera sucedido si hubiera «pensado» de otro modo? ¿Hubiera variado el desenlace si nuestro pavo hubiese pensado distinto? Llamamos a este ejercicio definir un *escenario contrafactual*. Definamos tres.

El pavo falsacionista

El pavo de nuestro primer escenario leyó a Chalmers. En su manual, el término *falsacionismo* (o alguno de sus sinónimos) se incluye ciento noventa y dos veces, por lo que este pavo se encuentra familiarizado con la propuesta de Karl Popper. Popper coincidía con Hume: la inferencia inductiva no nos habilita para afirmar que algo es universalmente verdadero. Pero, en su lugar —decía— podemos probar que, por el momento, no es falso. De ahí el desagradable nombre dado a su doctrina.

Nuestro pavo falsacionista formula un día la siguiente hipótesis: en esta granja se come a las 9. No interesa si la proposición le surgió en un sueño, por algo que recordó acerca de la comida de ayer o si fue una revelación camino al estanque. Nuestro pavo sabe que carece de importancia cómo surgen las hipótesis, mientras puedan ser sometidas a prueba. Y ésta, definitivamente, puede serlo. Va a comer un día a las 9 y, efectivamente, come. Va el siguiente a esa hora y come. Y así el siguiente y el siguiente y el que llega después de ese. Cuando otro pavo le pregunta si en la granja se come a las 9, contesta que no puede afirmarlo con certeza, pero sí puede decir que hasta ahora no ha resultado falso. Come un día más, otro, otro más. Y en la mañana del 24 de diciembre va a comer y es asesinado por el dueño de la granja. Ha falsado su hipótesis, aunque lamentablemente no pudo publicar el hallazgo.

El pavo indeterminista

La alternativa falsacionista ha llevado a nuestro segundo pavo por el mismo

camino que condujo al ingenuo pavo inductivista de los verdes céspedes de la granja al centro de la mesa navideña. Ahora, en este nuevo escenario, nuestro pavo se ha familiarizado con las teorías del caos. Se encuentra firmemente convencido, como el pavo falsacionista, de que ninguna evidencia pasada, por más amplia que sea, puede informarnos con certeza acerca del futuro. Pero considera, además, que no tiene sentido esforzarse en falsar enunciados del tipo «en esta granja se come a las 9», ya que habitamos un mundo regido por el azar. La hora en que se esparcirá el grano mañana, podrá ser... cualquiera. Pero a alguna hora debo ir a comer hoy, se dice el pavo. ¿Cómo actuó entonces?

Nuestro pavo desarma un reloj de pared analógico. Afloja levemente las agujas del reloj para que puedan girar libremente al impulsarlas con su pico. Cada día, al levantarse, las gira con fuerza. Como en una ruleta, el número que marque al detenerse será el ganador: la hora en que irá a comer ese día.

Llega el primer día. La aguja marca las 12:35. Va a comer y no hay granos. Amanece el segundo día: la aguja marca las 7:20. Va a comer y no hay granos. El tercer día: 9:30. Quedan unos pocos granos (sus compañeros han comido casi todo). Regresa hambriento, pero con su creencia en la insensatez de toda creencia acerca del futuro intacta. Siguiente día: 11:10. No hay granos. Para no continuar con el relato de esta agonía, digamos que, mucho antes de la víspera de Navidad, nuestro pavo ha muerto. De inanición. Mal destino para el pavo. Y cerdo en la mesa de Navidad.

El pavo pragmático

Tercer escenario. Nuestro pavo no leyó a Chalmers. Nada hubiera cambiado si lo hubiera hecho, ya que el manual no menciona ni una sola vez la filosofía fundada por Charles S. Peirce: el pragmatismo. Tampoco descubrió, como el pavo de Chalmers, en su primera mañana en la granja, que allí se come a las 9. En su primera mañana en la granja (cuando rompió el cascarón) seguramente descubrió luz y formas, texturas, sonidos... y muchos otros pavos.

A diferencia del pavo indeterminista, sí llegó a adquirir la creencia de que a las 9 a.m. se come en la granja. Comparte esta cualidad con el inductivista y el falsacionista. Pero en su caso no se trató de un hallazgo individual. Nuestro pavo vive en una granja con otros pavos. Desde pequeño acompañó a su mamá pava, junto con sus hermanos pavitos y los demás pavos de la granja, a comer a las 9. Todos van confiados porque cada vez que actuaron así regresaron con el estómago lleno. Cada día, cuando el Sol se encuentra a una altura del horizonte que los humanos llamamos las 9, actúan así. Y todos se hallan en ese estado físico que los hace aptos para ocupar el centro de una mesa de Navidad.

Una mañana, al llegar al sitio, ve con sorpresa que el dueño de la granja, en lugar de la conocida bolsa, tiene en su mano un cuchillo. El pavo ensaya rápidamente algunas hipótesis: no pudo abrir la bolsa con las manos y trajo este cuchillo para hacerlo; nos va a dar otro tipo de alimento que debe ser antes picado, por eso trajo el cuchillo. Pero no hay bolsa que abrir, no hay alimento que cortar... ¡El granjero quiere matarnos! Los pavos consideran plausible esta conjetura. Y corren.

En la granja y fuera de la granja

¿Qué hemos aprendido de los diversos escenarios? ¿Existe justificación para afirmar que el futuro será como el pasado? No. ¿Y para la afirmación de que el futuro no será como el pasado? Tampoco. El futuro puede ser, respecto a los miles de sucesos a los que nos enfrentamos a diario, de infinitos modos, solo uno de los cuales sería *como el pasado*. El problema es que debemos anticipar cómo será el futuro para poder actuar, ya que cada acción depende de la apuesta que realicemos al respecto.

Cuando apostamos a que el futuro será como el pasado, podemos continuar actuando como hasta ahora. Es la alternativa menos costosa frente a cualquiera que requiera ajustar el curso de nuestra acción. Si acertamos, ganamos. Si no acertamos, tenemos un plan de contingencia: ensayar una hipótesis que explique lo novedoso y ajustar nuestras acciones conforme a ella.

Cuando actuamos basados en la creencia de que el mundo seguirá siendo como era, actuamos racionalmente —hicimos la mejor de las apuestas—. Cuando, además, estamos dispuestos a revisar nuestras creencias acerca del mundo al enfrentarnos a una nueva evidencia, seguimos siendo racionales. Es racional estar dispuesto a modificar nuestras creencias frente a una nueva evidencia. Y, como señala Ian Hacking, «Esto es suficiente para que seamos agentes racionales en un mundo cambiante».

He aquí el motivo razonable que exige Russell para justificar el principio de inducción. No se justifica como un método de inferencia aislado, sino como parte de un proceso que involucra otros dos. La disputa entre inducción y deducción adquirió la forma que tiene en nuestros días gracias a Popper. Pero antes, Peirce propuso una solución epistemológica que no suponía optar por una de estas dos formas de inferencia, sino agregar una tercera.

Como consecuencia de la experiencia, esto es, por observación de *conjunciones constantes*, con nuestro pensamiento elaboramos reglas. Este es el momento inductivo del conocimiento. Las reglas se transforman en creencias. Y estas creencias producen hábitos de acción. Cuando actuamos, aplicamos aquellas reglas a los nuevos casos. Esto es deducción. Pero a veces la nueva experiencia no coincide con lo que esperábamos; rompe nuestras expectativas. Ensayamos entonces nuevas hipótesis que puedan explicar la novedad y componemos, así, una nueva regla. Al proceso de producir conjeturas ante casos sorprendentes —sorprendentes porque no se ajustan a la regla en la que creíamos hasta entonces—, Peirce lo llama abducción.

Esta concepción del proceso de conocer parece ajustarse más que otras al modo en que se desenvuelve la ciencia. También al modo en que nos desenvolvemos, en general, los seres humanos. Y, quién sabe, tal vez incluso los pavos. IyC

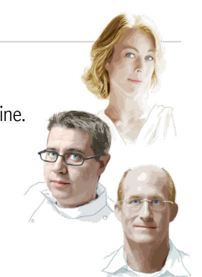
PARA SABER MÁS

¿Qué es esa cosa llamada ciencia? Alan F. Chalmers. Siglo XXI, 2000.
An introduction to probability and inductive logic. Ian Hacking. Cambridge University Press, 2001.
Abductive reasoning: Logical investigations into discovery and explanation. Atocha Aliseda. Springer, 2006.
Deducción, inducción e hipótesis. Charles Sanders Peirce, 1878. Aguilar, 1970. Disponible en http://www.unav.es/gep
La doctrina de las posibilidades. Charles Sanders Peirce, 1878. Disponible en http://www.unav.es/gep

EN NUESTRO ARCHIVO

La lógica de la creatividad científica: El falibilismo y la abducción de Charles S. Peirce. Jaime Nubiola en *IyC*, noviembre de 2019.
¿Qué es la razón? Herbert Schnädelbach en *MyC*, núm. 106, 2021.

por Kimberley R. Miner, Arwyn Edwards y Charles Miller



Kimberley R. Miner, especialista en riesgos del cambio climático, es profesora del Instituto sobre Cambio Climático de la Universidad de Maine. **Arwyn Edwards,** de la Universidad de Aberystwyth, es experto en ambientes microbianos paraglaciales. **Charles Miller** es especialista en el ciclo del carbono y el Ártico en el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California.

Vigilemos los microbios del Ártico

Muchos de los liberados por la fusión del permafrost tienen efectos imprevisibles

En los últimos diez años, el calentamiento del Ártico ha superado las previsiones. Los datos indican que los polos se están calentando cuatro veces más deprisa que el resto del mundo. Ello ha provocado la fusión de los glaciares y del permafrost a unos niveles que no se esperaban hasta 2050 o más tarde. En Siberia y el norte de Canadá, este deshielo abrupto ha creado accidentes geográficos con hondonadas, llamadas termokarst, donde el permafrost más antiguo y profundo está expuesto al aire templado por primera vez en cientos o incluso miles de años. A medida que aumente la infiltración del agua, ¿se descongelará más deprisa el permafrost? Y, de ser así, ¿qué organismos congelados desde hace tiempo podrían «despertarse»?

El permafrost cubre el 24 por ciento de la superficie terrestre. El de las tierras árticas ofrece una biodiversidad inexplorada de microorganismos y de reacciones asociadas a ellos, como la liberación de carbono a la atmósfera (en algunos lugares están enterrados cientos de millones de años de carbono). Los estratos pueden contener microbios congelados antiguos, megafauna del Pleistoceno e incluso víctimas de la viruela enterradas. A medida que se acelera la fusión del permafrost, los científicos se esfuerzan por descubrir e identificar bacterias, virus y otros microbios que pueden estar emergiendo.



DESCONGELACIÓN del permafrost en la isla de Herschel, en Canadá.

Algunos de ellos son bien conocidos. Las arqueas metanógenas, por ejemplo, metabolizan el carbono del suelo y liberan metano, un potente gas de efecto invernadero; pero otros, los metanótrofos, consumen ese gas. El equilibrio entre ambos desempeña un papel fundamental en la futura evolución del calentamiento climático.

Otros microorganismos son conocidos pero no puede predecirse su comportamiento cuando despierten. Datos recientes apuntan al desplazamiento de genes entre ecosistemas. En el océano Ártico, la bacteria planctónica *Chloroflexi* ha adquirido genes de *Actinobacteria,* de vida terrestre, para degradar el carbono. A medida que los ríos árticos, con un caudal mayor a causa del deshielo, transportaban al mar sedimentos procedentes del permafrost, también traían consigo genes para procesar el carbono.

El deshielo del permafrost en Siberia provocó en 2016 un brote de carbunco y la muerte de 200.000 renos y un niño. No obstante, las esporas resistentes de *Bacillus anthracis* pueden representar una excepción. Soportan el ciclo extremo de congelación y descongelación que degrada patógenos bacterianos y víricos, más delicados. Sus características adaptables les han permitido permanecer congelados y viables durante siglos de inactividad.

Los organismos que coevolucionaron desde el Cenozoico hasta el Pleistoceno en ecosistemas ahora extintos también pueden emerger e interaccionar de formas nuevas con nuestro ambiente actual. Un posible ejemplo es el virus *Alaskapox*, causante de lesiones cutáneas, que ha aparecido y desaparecido en Alaska dos veces en los últimos cinco años. Puede que este nuevo virus se haya transmitido a través del contacto entre animales y humanos, pero aún se desconoce su origen.

El Ártico alberga microbios resilientes y tenaces adaptados al frío. Algunos son psicrófilos (especies especialistas que resisten la exposición prolongada a temperaturas gélidas) y pueden perderse con el calentamiento. Otras sobreviven porque son muy adaptables y habitan muchos y variados nichos. Una mejor comprensión de la ecología y la diversidad genómica de las especies generalistas puede ofrecernos una ventana al microbioma del Ártico del futuro. Todo apunta que estas últimas ganarán a las especialistas.

Y luego están los microbios desconocidos por los científicos, que pueden representar una nueva amenaza.

Está claro que cuanto más cálido hagamos el Ártico, más extraño se volverá. Representa un desafío evaluar con precisión los riesgos sin mejores conjuntos de datos microbianos de esa región. Debemos prestar atención tanto a las incógnitas conocidas, por ejemplo, las bacterias resistentes a los antibióticos, como a las incógnitas desconocidas, entre ellas el riesgo de que investigadores en biología sintética revivan genomas víricos antiguos y escasamente descritos.

Por todas estas razones, debemos contar con directrices para futuras investigaciones sobre el Ártico. A medida que aumentan los viajes a esa región, también crece la probabilidad de exportación e importación de patógenos. Las directrices de protección planetaria que siguen las agencias espaciales para prevenir la contaminación interplanetaria pueden proporcionar un marco para continuar de manera segura la investigación microbiológica. Deben establecerse medidas de biovigilancia para proteger a las comunidades en el Ártico y más allá. A medida que el continente se vaya transformando, una cosa está clara: mientras el clima va calentando el repositorio microbiano, las repercusiones están aún por ver. IyC

UNIVERSIDAD DE ABERYSTWYTH (*A. Edwards*); WIKIMEDIA COMMONS/CC BY SA 2.0 (*isla de Herschel*)
TRABAJO SUBVENCIONADO POR EL LABORATORIO DE PROPULSIÓN A REACCIÓN DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA, BAJO CONTRATO CON LA NASA (80NM0018D0004), EL CONSEJO BRITÁNICO DE INVESTIGACIONES DEL MEDIO NATURAL (NE/S1001034/1) Y EL CONSEJO DE INVESTIGACIONES DE NORUEGA BIOICE.

por José Manuel López Nicolás



José Manuel López Nicolás, catedrático de bioquímica y biología molecular en la Universidad de Murcia, investiga y escribe sobre nutrición y tecnología de los alimentos.

La infección saludable

¿Puede un hongo patógeno dar lugar a un vino exquisito y, a la vez, a un alimento funcional?

En los supermercados encontramos dos productos que están claramente de moda: el vino Château d'Yquem y los complementos alimenticios ricos en resveratrol. Lo que poca gente sabe es que ambos tienen su origen en una infección.

El patógeno responsable es *Botrytis cinerea*, un hongo que puede infectar la uva bajo condiciones de humedad. Si tras la infección las condiciones ambientales siguen siendo húmedas, se produce la podredumbre gris, capaz de arruinar cosechas enteras. En cambio, si a las condiciones de humedad necesarias para la infección por *B. cinerea* le suceden otras de sequedad, se produce la podredumbre noble.

En las uvas botrificadas de forma noble, el hongo elimina el agua, lo que incrementa el porcentaje de azúcares, glicerina, ácidos frutales y minerales. Estas uvas pasificadas pueden utilizarse para producir vinos muy dulces con una textura grasa y viscosidad especial.

La obtención de vino botrificado no es fácil. La dependencia de las condiciones climatológicas hace que su producción sea arriesgada y muy variable de un año a otro. En algunas zonas vinícolas se fumigan las uvas con esporas de *B. cinerea*. En otras, en cambio, se recurre a la inoculación natural a partir de esporas presentes en el medio.

La región históricamente más asociada con el vino botrificado es la de Tokaj-Hegyalja, en Hungría. Sin embargo, en la actualidad, la principal región productora de vino botrificado es Sauternes, en Burdeos. Allí se produce el renombrado Château d'Yquem, quizás el vino botrificado más famoso. Respecto a sus maridajes, en Francia estos vinos se combinan tradicionalmente con los platos de *foie*, mientras que en España solemos servirlos para acompañar un postre.

Pero cuando la uva es infectada por *B. cinerea* no aumenta solo la cantidad de azúcares principalmente; también se dispara la concentración de resveratrol. Esta molécula de la familia de los estilbenos se encuentra en diferentes plantas (uva, algunos frutos secos, cacao, etcétera), que la sintetizan en respuesta a una infección microbiana. Muchos investigadores aprovechan este incremento en la cantidad de resveratrol para extraerlo de las uvas botrificadas y adicionarlo a alimentos funcionales o complementos alimenticios. La razón es que el resveratrol destaca por su alta capacidad antioxidante, neuroprotectora, antiinflamatoria e inmunitaria.



WIKIMEDIA COMMONS/PODREDUMBRE NOBLE/CC BY 3.0

Sin embargo, la mayoría de estas propiedades saludables se han demostrado solo en estudios in vitro, en cultivos celulares o en modelos animales, pero no en humanos. Una de las razones de la poca efectividad del resveratrol en humanos es su baja biodisponibilidad. Tras la ingesta oral, esta molécula es rápidamente absorbida en el intestino y llega al hígado, donde sufre reacciones de fase II (glucuronidación y sulfatación principalmente) que lo degradan. Esto provoca que apenas unas trazas del resveratrol ingerido estén disponibles en sangre para llegar a los tejidos diana y actuar a la concentración necesaria. Los productos resultantes de las reacciones de fase II son excretados finalmente a través de la orina y las heces. La conclusión es clara: se necesitan nuevas estrategias que aumenten la biodisponibilidad del resveratrol en humanos.

Una de estas estrategias se está desarrollando en los laboratorios de la Universidad de Murcia en el marco de un proyecto de financiación pública. Consiste en «hackear» el resveratrol uniéndolo a un ácido graso mediante una reacción de esterificación. El complejo ácido graso-resveratrol se transporta por el sistema linfático a los diferentes tejidos sin tener que pasar por el hígado, evitando así sufrir reacciones de fase II y ser degradado. Una vez el resveratrol ha llegado intacto a los tejidos diana, unas enzimas allí presentes llamadas esterasas rompen los enlaces ácido graso-resveratrol, quedando de nuevo libre el estilbeno para ejercer sus efectos saludables. De esta forma se pretende aumentar la biodisponibilidad del resveratrol en humanos y que la EFSA le conceda por primera vez una «alegación saludable», permitiendo así que se comercialicen alimentos funcionales enriquecidos en este estilbeno en cuya publicidad se pueda hacer alusiones a sus propiedades beneficiosas.

Estimados lectores, hoy les he mostrado como aprovechándonos de una infección fúngica los humanos somos capaces de elaborar un vino de exquisita calidad y, al propio tiempo, desarrollar un alimento funcional. ¡Qué maravilloso es el Planeta Alimentación!

por Pere Castells y Claudi Mans

Claudi Mans es catedrático emérito de ingeniería química de la Universidad de Barcelona y divulgador científico.

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es presidente del congreso mundial sobre Ciencia y Cocina de Barcelona.



La revolución pendiente

Necesitamos una gastronomía más humana, sostenible y responsable

Hace un par de años, en marzo de 2019, cocineros y científicos de todo el mundo reunidos en el Congreso Mundial sobre Ciencia y Cocina de Barcelona (*fotografía*) firmaron un manifiesto. Con él pretendían consolidar y marcar el rumbo de una nueva disciplina que ha tomado forma a lo largo de los últimos años: la gastronomía científica.

El documento resalta, entre otros puntos, que la cocina es una actividad esencial para el ser humano, que lo distingue de los otros animales y que es necesaria para su bienestar. Asimismo, reivindica que la gastronomía científica debe ser considerada una disciplina nueva e independiente, con sus propios paradigmas y sinergias con otras ciencias afines.

Y es que en el hecho alimentario confluyen múltiples y variados campos de conocimiento. La nutrición y la dietética velan para que cada uno de nosotros tenga una alimentación saludable. La veterinaria y las ciencias y tecnologías de los alimentos se ocupan de la producción primaria (agricultura, ganadería, pesca), así como de la preparación y distribución de los alimentos a escala industrial, doméstica y en la restauración; también velan por la seguridad alimentaria, en el sentido de que lo que comamos sea sanitariamente seguro; y en el sentido de que la disponibilidad de alimentos sea suficiente y estable para toda la población —con los retos políticos y económicos que ello supone—. Finalmente, la gastronomía procura que comer sea un acto organoléptica y socialmente placentero.

No podía faltar en el manifiesto el valor de la educación. La formación es esencial en todos los ámbitos; también en el culinario. Los entornos gastronómicos deben ser lugares en los que se educa de forma global, colaborando con la educación reglada de forma sistemática.

Pero es el último punto de esta declaración de principios el que defiende la idea más innovadora: que la gastronomía científica debería avanzar según los 17 objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas, en especial los valores globales de sostenibilidad, responsabilidad social y humanidad. Pero ¿cómo se traducen, en la cocina, estos objetivos? Básicamente, mediante la promoción de un ambiente de trabajo óptimo, el cuidado del entorno de la producción de materias primas y productos intermedios, el rechazo a cualquier relación con entornos ambientales y sociales no adecuados, y el establecimiento de colaboraciones con entidades sociales, culturales y académicas que promuevan esos valores.



SCIENCE & COOKING WORLD CONGRESS BARCELONA 2019. CORTESÍA DE PERE CASTELLS

En lo que concierne a la sostenibilidad, resulta ilustrativa una actuación reciente: la prestigiosa guía Michelin introdujo en 2020 un nuevo sello de calidad para identificar los restaurantes sostenibles, cuyo pictograma consiste en un trébol verde de cinco hojas. Su objetivo es identificar y valorar todos los restaurantes que siguen buenas prácticas ambientales, siendo también un modo de reconocer y recompensar a los cocineros que se preocupan por el impacto que tiene su actividad en el planeta.

Otro aspecto relacionado con el punto anterior es el compromiso con la recuperación. Nos referimos al aprovechamiento máximo de los productos que el espacio gastronómico ha venido desestimando hasta el momento. Para ello hace falta generar una estrategia que minimice los productos desechados, confiriéndoles valor gastronómico y nutricional. Como aspecto colateral, debe apostarse por el reciclaje de los envases y otros elementos considerados hasta ahora no aprovechables. El restaurante del futuro será sostenible o no será [*véase* «Restaurantes sostenibles», por Claudi Mans y Pere Castells; Investigación y Ciencia, junio de 2020].

Estimados lectores, después de más de quince años de recorrido y con el deseo de haberles introducido en el apasionante mundo de la investigación gastronómica, la sección de «Ciencia y gastronomía» llega a su fin. Nos despedimos con un juego, una suerte de «Quién es quién en el mundo de la gastronomía científica»: ¿reconocen a los firmantes del manifiesto que aparecen en la fotografía? La solución, en nuestra web.

METEOROLOGÍA

Pronósticos para 28 días

UNA TORMENTA se cierne sobre Kansas.

del tiempo

Los meteorólogos predicen de manera cada vez más precisa si el tiempo será cálido, frío, húmedo o seco al cabo de cuatro semanas

Kathy Pegion



Kathy Pegion es profesora en el Departamento de Ciencias Atmosféricas, Oceánicas y Terrestres de la Universidad George Mason, en Virginia. Supervisa el proyecto SubX, que genera predicciones meteorológicas de hasta cuatro semanas, e investiga sobre pronósticos climáticos que puedan abarcar varios años.





«Hola, Google: ¿qué tiempo hace?» Nos hemos acostumbrado a tomar decisiones basadas en pronósticos meteorológicos precisos para los próximos tres, cinco o siete días. Las familias planean excursiones para el fin de semana. Los hortelanos protegen los naranjos si se anuncian heladas. Los servicios de emergencias evacúan ciudades que quedarán a favor del viento durante un incendio forestal. Y las poblaciones ribereñas amontonan sacos de arena para resguardar sus hogares y negocios cuando se avecinan lluvias torrenciales.

Sin embargo, disponer de pronósticos precisos a tres o cuatro semanas vista facilitaría la toma de todo tipo de decisiones. Los agricultores podrían saber si se prevén heladas tardías y evaluar el riesgo de sembrar sus campos al inicio de la primavera. Las estaciones de esquí no empezarían a fabricar nieve si se estima probable que las temperaturas vuelvan a subir antes de que se forme una buena base. Los gestores de recursos hídricos podrían vaciar los embalses ante la previsión de inundaciones primaverales, o almacenar agua si se espera una sequía. Y tendríamos la opción de planificar las vacaciones del mes que viene.

En los últimos años, los científicos atmosféricos han comenzado a publicar predicciones meteorológicas «subestacionales» que se alargan hasta tres y cuatro semanas. Los pronósticos habituales de siete o diez días proporcionan valores diarios para las temperaturas máximas y mínimas, las probabilidades de lluvia o nieve y las condiciones de viento. Las predicciones subestacionales, en cambio, evalúan si las temperaturas serán más cálidas o más frías que el promedio histórico correspondiente a esas mismas fechas, y si se producirán más o menos precipitaciones de lo habitual. También prevén fenómenos meteorológicos extremos y peligrosos, y su marco temporal llena el gran vacío existente entre los partes meteorológicos a corto plazo y los pronósticos estacionales, los cuales anuncian tendencias generales como, por ejemplo, si las condiciones de El Niño en el océano Pacífico provocarán un verano cálido en Norteamérica [*véase* «Tras las huellas de El Niño», por Emily Becker; Investigación y Ciencia, diciembre de 2016].

Los pronósticos subestacionales son cada vez mejores. Así, un conjunto de modelos meteorológicos empleados en el Experimento Subestacional (SubX), que dirijo desde la Universidad George Mason junto a un colaborador de la Universidad de Miami, ha logrado predecir diversos eventos de forma precisa y con varias semanas de antelación: las precipitaciones asociadas al huracán Michael en 2018, una entrada de aire gélido en el Medio Oeste de EE.UU. a finales de enero de 2019 y la ola de calor de julio de 2019 en Alaska. El proyecto SubX, iniciado hace cuatro años, combina los pronósticos de siete centros de investigación climática y terrestre de Estados Unidos y Canadá.

De cara a este artículo, el 27 de febrero de 2020 generé con SubX mapas meteorológicos de EE.UU. y de todo el mundo para el período del 21 al 27 de marzo, es decir, con una antelación de entre 23 y 29 días. Como veremos, algunas predicciones acertaron de pleno, aunque un par de ellas no lo hicieron.

FACTORES METEOROLÓGICOS

Las previsiones del tiempo para siete o diez días que solemos emplear se basan en modelos informáticos que simulan la evolución de la atmósfera. Para ello, emplean ecuaciones matemáticas que estiman cómo varían las temperaturas, los vientos y la humedad segundo a segundo y día tras día. Desde el nacimiento de los modelos meteorológicos en la década de 1950, los pronósticos han mejorado gracias a nuestro mayor conocimiento científico de esas variables y al aumento de la potencia computacional. En 1990, los pronósticos de tres días eran los únicos que superaban el 80 por ciento de precisión. Hoy en día, las predicciones de cinco y siete días también lo logran.

En un pronóstico para tres o cuatro semanas hay que considerar muchos más factores. Al igual que en las predicciones para siete días, se parte de las condiciones actuales. Cada día, las grandes agencias meteorológicas y espaciales de todo el mundo, como la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano de EE.UU. (NOAA) y la NASA, proporcionan cerca de cuatro millones de medidas de la temperatura y presión atmosféricas, los vientos y la humedad, obtenidas con globos sonda, estaciones meteorológicas, aviones y satélites. Los científicos atmosféricos combinan todos esos datos en un modelo meteorológico.

EN SÍNTESIS

Los meteorólogos obtienen predicciones cada vez más precisas del tiempo que hará en las siguientes cuatro semanas, en parte gracias al uso de potentes superordenadores.

Otro factor esencial es nuestra mayor comprensión de patrones climáticos globales como la oscilación de Madden-Julian y la oscilación del Atlántico Norte.

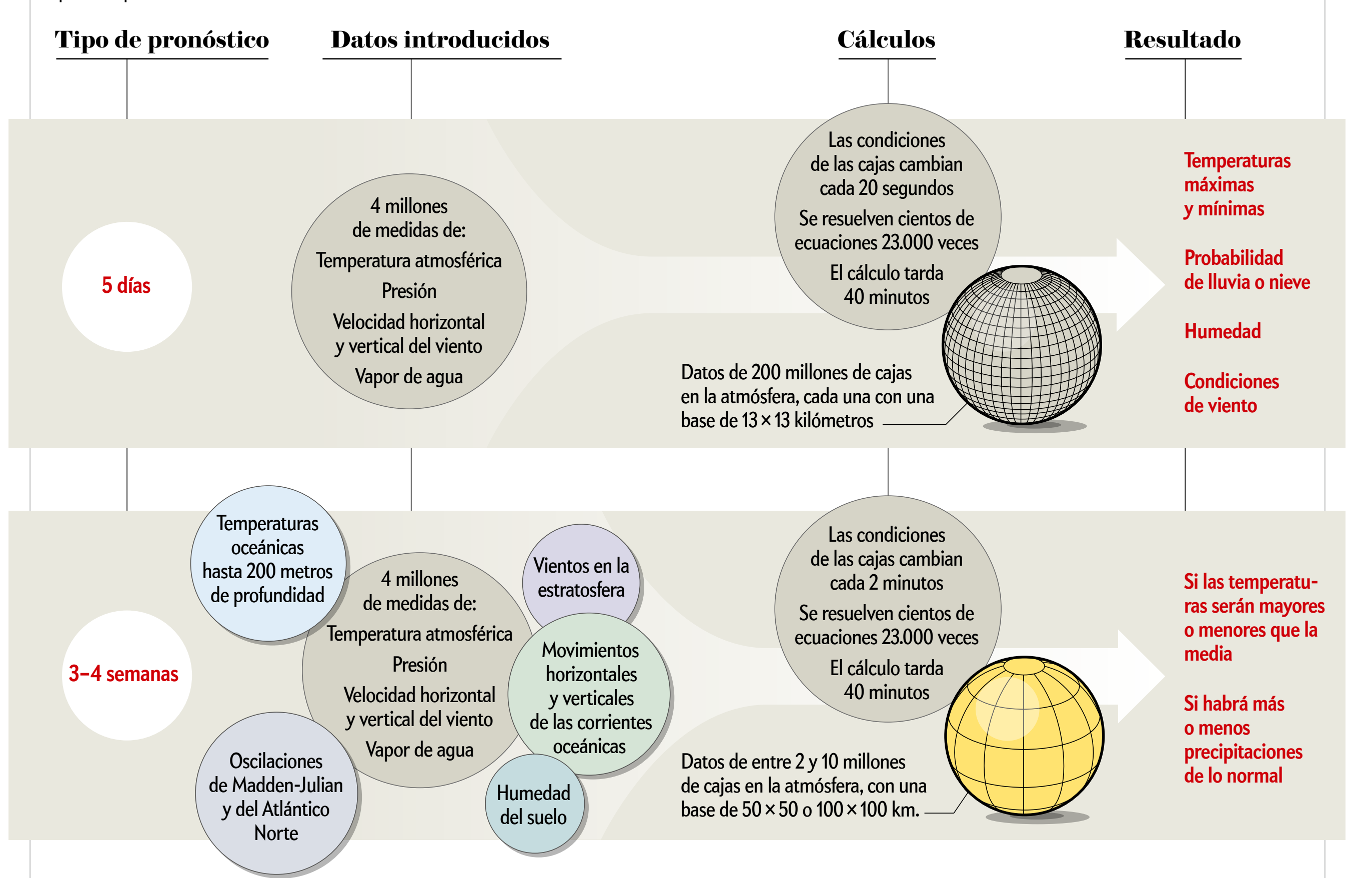
Un pronóstico de cuatro semanas realizado para este artículo vaticinó correctamente las temperaturas y precipitaciones inusuales que registraron algunas regiones de EE.UU. y del resto del mundo, aunque otras predicciones no fueron tan acertadas.

PÁGINAS ANTERIORES: JOHN FINNEY, GETTY IMAGES

PREDICCIONES SUBESTACIONALES

Datos atmosféricos y pronósticos

Una predicción meteorológica para tres o cuatro semanas requiere muchos datos y una gran potencia computacional, pero se basa en la misma información que un pronóstico de cinco días. También se añaden aspectos climáticos globales, a la vez que se reduce el nivel de detalle para que el cálculo sea factible. El resultado predice si la temperatura y las precipitaciones serán mayores o menores que los promedios históricos.



JEN CHRISTIANSEN

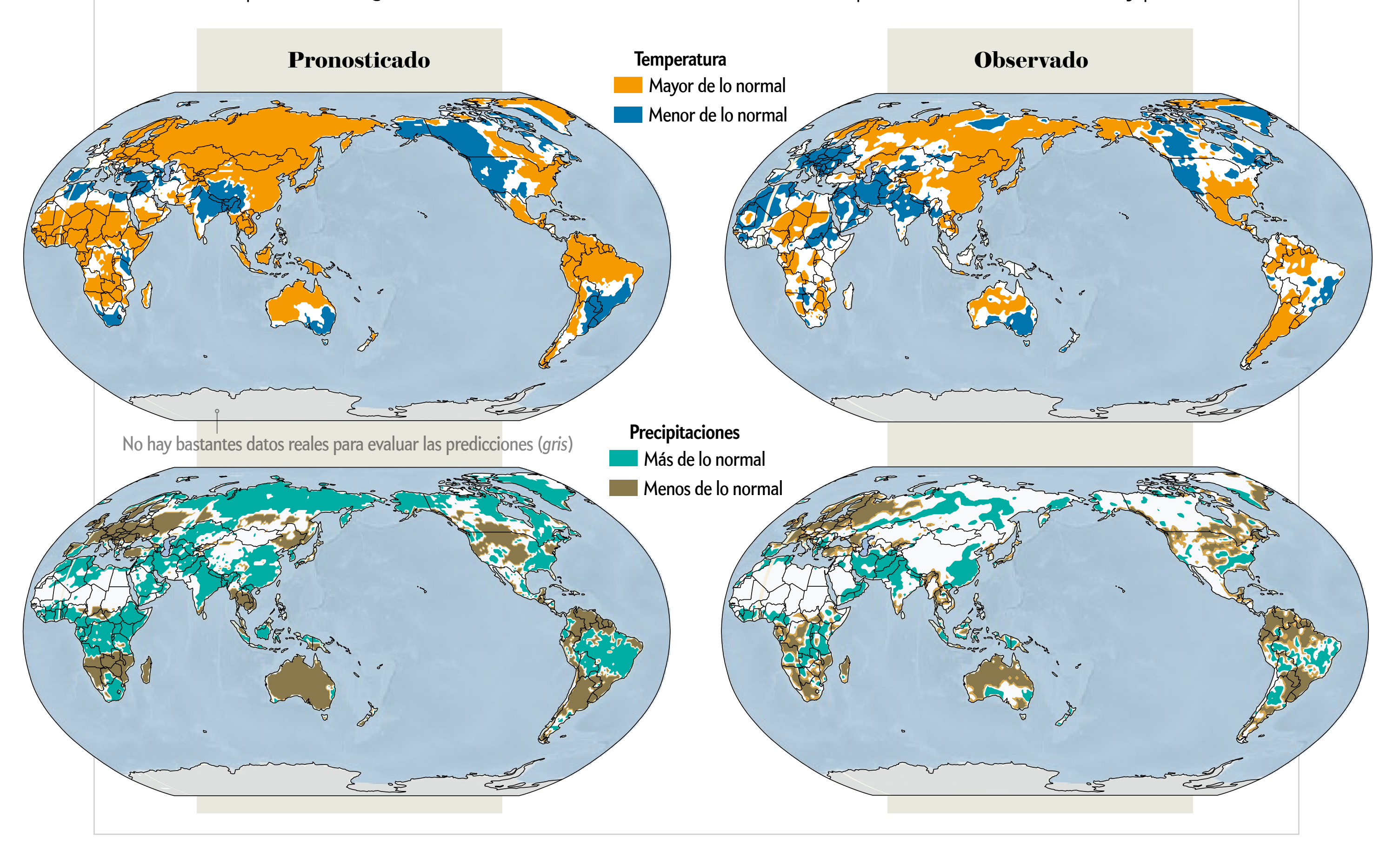
Para ampliar un pronóstico de siete días hasta las tres o cuatro semanas, los expertos añaden otros factores, como las temperaturas y corrientes oceánicas. También analizan las condiciones del suelo: unos días de tiempo cálido y seco pueden eliminar la humedad del suelo, lo que conlleva una menor evaporación; eso reduce aún más la humedad atmosférica y las precipitaciones, y puede marcar el comienzo de una sequía. Los científicos también consideran los vientos que soplan en la estratosfera, una capa que se extiende entre unos 10 y unos 48 kilómetros de altitud, por encima de donde vuelan los aviones. Los vientos afectan a la posición y la fuerza de la corriente en chorro, que normalmente desplaza las tormentas de oeste a este en el hemisferio norte y determina qué zonas pueden sufrir temperaturas extremas [*véase* «El comportamiento anómalo de la corriente en chorro», por Jeff Masters; Investigación y Ciencia, febrero de 2015].

Los modelos subestacionales también deben tener en cuenta ciertos fenómenos meteorológicos y climáticos globales. Uno de ellos es la oscilación de Madden-Julian (OMJ), una extensa área de nubes, lluvia y viento que se origina en las aguas tropicales de los océanos Índico y Pacífico, y que se desplaza de oeste a este del planeta durante varios meses. El fenómeno se produce entre cuatro y seis veces al año, ya sea de manera sucesiva o aleatoria. La OMJ influye en los vientos, la ubicación de los anticiclones y las borrascas, y los lugares donde se forman frentes en diversas regiones. Por ejemplo, tiene un gran impacto en la localización de los «ríos atmosféricos» en el oeste de Norteamérica (largas y estrechas franjas de lluvias torrenciales que se extienden desde el centro del océano Pacífico hasta la costa oeste). Los ríos atmosféricos pueden causar inundaciones devastadoras o ser una importante fuente de agua [*véase* «Las próximas megainundaciones», por Michael D. Dettinger y B. Lynn Ingram; Investigación y Ciencia, octubre de 2013]. La OMJ también puede producir un aumento o disminución semanal de la cizalladura del viento en distintas zonas, lo que determina dónde se forman los ciclones tropicales. Es probable que este fuera uno de los factores que ayudaron a SubX a predecir el huracán Michael.

Otro de esos fenómenos es la oscilación del Atlántico Norte (OAN), un acoplamiento persistente entre centros de bajas y altas presiones en el norte del océano Atlántico. La OAN influye en la posición de la corriente en chorro y en la del vórtice polar, que puede desplazar masas de aire gélido del Ártico hacia Europa y el noreste de EE.UU.

Temperatura y precipitaciones dentro de un mes

El 27 de febrero de 2020, el modelo de predicciones subestacionales SubX pronosticó el tiempo que haría en el mundo entre el 21 y el 27 de marzo, casi un mes después. Sus mapas indicaban si la temperatura y las precipitaciones serían mayores o menores de lo «normal» (los promedios entre 1999 y 2015). Los mapas meteorológicos reales de marzo muestran que SubX acertó al predecir condiciones inusualmente secas en Europa y en Australia. En Estados Unidos, vaticinó correctamente frío en el oeste y calor en el este. En cambio, en el noreste no hizo tanto calor como había augurado. SubX predice cuánto se alejarán las condiciones meteorológicas de la media histórica, pero los valores aún no son muy precisos.



MACRODATOS

Calcular un pronóstico subestacional exige realizar tantas operaciones con tantas variables que supone un reto hasta para los superordenadores más potentes. Los modelos dividen la atmósfera tridimensional en muchas cajas computacionales más pequeñas. Por ejemplo, el último modelo meteorológico global de la NOAA emplea unos 200 millones de cajas. Las más próximas a la superficie terrestre cubren una región de 13 kilómetros de largo por 13 kilómetros de ancho y 50 metros de alto. Sobre ellas se apilan otras cajas, cuya altura va aumentando a medida que ascendemos, hasta alcanzar 700 metros en la estratosfera. El modelo predice la evolución de la atmósfera en cada una de estas cajas cada 20 segundos, mediante ecuaciones que determinan la temperatura, la presión, la velocidad horizontal y vertical del viento y la humedad.

Las cajas son como los píxeles de una imagen: en conjunto, ofrecen una visión completa de las futuras condiciones meteorológicas. Para elaborar un pronóstico de cinco días, un modelo resuelve cientos de ecuaciones unas 23.000 veces, lo que supone unos 40 minutos en un superordenador de 1500 núcleos.

El objetivo es conseguir la resolución más alta posible sin que el tiempo de cálculo se alargue demasiado. Los modelos actuales para cinco días no recogen ciertos factores en las cajas, como las nubes individuales, las tormentas o el efecto de terrenos complejos como montañas y costas. Si mejorásemos la resolución del modelo usando cajas con una base de 6 por 6 kilómetros (el tamaño necesario para representar tales elementos), se tardaría más de cinco horas en generar un pronóstico de cinco días. Los meteorólogos locales no pueden esperar tanto si quieren ofrecer información puntual.

Para crear un modelo viable de predicciones de cuatro semanas que incorpore todos los factores a gran escala, como la OMJ, debemos agrandar las cajas, lo que implica reducir su número desde 200 millones a entre 2 y 10 millones, dependiendo del modelo. Ampliar el ancho de las cajas hasta 50 o 100 kilómetros nos permite realizar los numerosos y complejos cálculos requeridos con la misma potencia computacional y en los mismos 40 minutos, pero perdiendo detalle. Podemos comparar un pronóstico para dentro de tres o cuatro semanas con los píxeles granulados de una imagen de baja resolución: distinguimos las

KATHY PEGION

características principales, pero los detalles no son nítidos. Las grandes áreas con temperaturas cálidas y lluvias son como la silueta de una persona, mientras que los elementos más pequeños, como una tormenta concreta, resultan difíciles de identificar.

Con todo, gracias a los avances en nuestra comprensión de los fenómenos globales, en la eficacia de los ordenadores y en la complejidad de los algoritmos, los modelos actuales logran generar una imagen de baja resolución que los meteorólogos encuentran aceptable.

COMBINACIÓN DE MODELOS

Cada semana, los siete centros que contribuyen al proyecto SubX elaboran sus propios pronósticos para períodos de entre 32 y 45 días, añadiendo varios miles de observaciones respecto a las que incluirían en una predicción de siete días. Los grupos envían su información a una base de datos central alojada en el Instituto Internacional de Investigación del Clima y la Sociedad de la Universidad de Columbia. El equipo de SubX combina los datos en los ordenadores de la Universidad George Mason y es el único que integra varios modelos para producir un pronóstico oficial. Otra decena de instituciones de todo el mundo, como el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo, obtienen predicciones subestacionales a partir de un solo modelo.

SubX genera un mapa térmico que indica las regiones donde se esperan temperaturas más cálidas o más frías que el promedio histórico. También crea un mapa de precipitaciones que muestra si las condiciones serán más húmedas o secas de lo habitual. Al combinar los siete modelos se obtiene una previsión mucho más precisa que con cualquiera de ellos por separado, en parte porque promediamos sus datos, pero también porque aprovechamos los puntos fuertes de cada modelo. Por ejemplo, todos los modelos calculan las condiciones de nubosidad dentro de las cajas de manera ligeramente distinta, y combinarlos permite optimizar las estimaciones. En los pronósticos para EE.UU., las predicciones de SubX son más acertadas que las del mejor modelo individual el 60 por ciento de las veces para la temperatura y el 81 por ciento de las veces para las precipitaciones.

Los científicos del proyecto SubX estudiamos la mejor manera de combinar los modelos, a la vez que los refinamos volviendo la mirada atrás. Durante un año, SubX generó numerosas predicciones a tres y cuatro semanas vista a partir de las condiciones meteorológicas semanales registradas entre 1999 y 2015, creando así una base de datos con más de 20 teraoctetos de información. Al comparar cada pronóstico con las condiciones reales que se observaron tres y cuatro semanas después, pudimos evaluar los efectos de una gran variedad de circunstancias climáticas.

Los aciertos e imprecisiones detectados nos ayudan a mejorar distintos aspectos de los modelos, como su capacidad para representar la estratosfera, la OMJ y la OAN o para predecir las repercusiones de esos fenómenos en las condiciones meteorológicas de diversas regiones. Por ejemplo, dos de los grupos de modelización de la NOAA que suministran datos a SubX perfeccionaron las ecuaciones que describen la nubosidad, las tormentas y las lluvias con el fin de caracterizar mejor la OMJ. Después volvieron a revisar el tiempo registrado en el pasado y demostraron que sus nuevos pronósticos históricos a tres y cuatro semanas vista eran más precisos.

LA PRUEBA DE FUEGO

¿Cómo de acertado fue el pronóstico que realizó SubX el 27 de febrero de 2020 para el período del 21 al 27 de marzo? En EE.UU., los mapas generados predijeron temperaturas cálidas en el este y frías en el oeste, además de un adelanto de la primavera en la costa este y una prolongación del invierno en el oeste. También se esperaban más precipitaciones de lo normal en el sureste del país, después de un febrero ya húmedo.

Y, en efecto, el tiempo en el sureste de EE.UU. siguió siendo inusualmente pluvioso. Las predicciones de lluvia, sumadas al deshielo primaveral y a un río Mississippi ya muy crecido, podrían haber aportado información valiosa para preparar la región de cara a posibles inundaciones. De hecho, en Nueva Orleans, el nivel del Mississippi se acercó al valor «de crecida» (a partir del cual el agua comienza a inundar los terrenos ribereños y a causar daños) el 27 de febrero, disminuyó un poco tras registrar un máximo el 8 de marzo y volvió aumentar a finales de mes, hasta alcanzar de nuevo el nivel de crecida el 12 de abril. El acierto de SubX se debió en parte a que logró prever las temperaturas oceánicas cálidas que experimentó el golfo de México, un factor clave para que se produzcan lluvias en el sureste de EE.UU. SubX también pronosticó tanto las condiciones anormalmente frías a lo largo de la costa oeste como las más secas en el norte de California y la costa de la Columbia Británica.

En el resto del mundo, SubX atinó al vaticinar condiciones más secas de lo normal en Europa y más cálidas en Asia, gracias a que predijo con éxito la posición de los sistemas de bajas y altas presiones. También pronosticó correctamente las temperaturas en Australia, como resultado de su capacidad para prever las regiones nubladas y soleadas asociadas a la OMJ.

Sin embargo, en EE.UU., SubX sobreestimó el área geográfica que registraría condiciones más cálidas de lo habitual en el Atlántico Medio, el noreste y el valle del río Ohio. No predijo de manera correcta ciertos detalles de los anticiclones y las borrascas, lo cual afectó a sus previsiones. El modelo tampoco pronosticó el tiempo anormalmente húmedo que hizo en Oregón, aunque el período de lluvias intensas se redujo a los días 24 y 25 de marzo. En realidad, la mayoría de los siete modelos que combina SubX tampoco fueron capaces de predecir esas precipitaciones una semana antes de que ocurrieran: la tormenta que las produjo supuso un reto hasta para los pronósticos de siete días. En la atmósfera, el caos puede aparecer de forma inesperada.

Aún falta mucho para que las predicciones subestacionales sean tan buenas como los pronósticos para siete días, y puede que nunca alcancen su precisión. Pero muchos científicos atmosféricos trabajamos duro para lograrlo. Todas las semanas publico una predicción global de cuatro semanas realizada con cada uno de los siete modelos y con el modelo combinado de SubX. A su vez, el Centro de Predicciones Climáticas de la NOAA publica previsiones con tres y cuatro semanas de adelanto para EE.UU. con la ayuda de SubX. Quizás en un decenio, al consultar el parte del tiempo en nuestro teléfono, veamos el icono de un sol o de una nube sobre un rótulo que diga «pronóstico de 28 días».

PARA SABER MÁS

The quiet revolution of numerical weather prediction. Peter Bauer, Alan Thorpe y Gilbert Brunet en *Nature*, vol. 525, págs. 47–55, septiembre de 2015.
The Subseasonal Experiment (SubX): A multimodel subseasonal prediction experiment. Kathy Pegion et al. en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 100, n.º 10, págs. 2043–2060, octubre de 2019.
Página web del proyecto SubX: http://cola.gmu.edu/subx

EN NUESTRO ARCHIVO

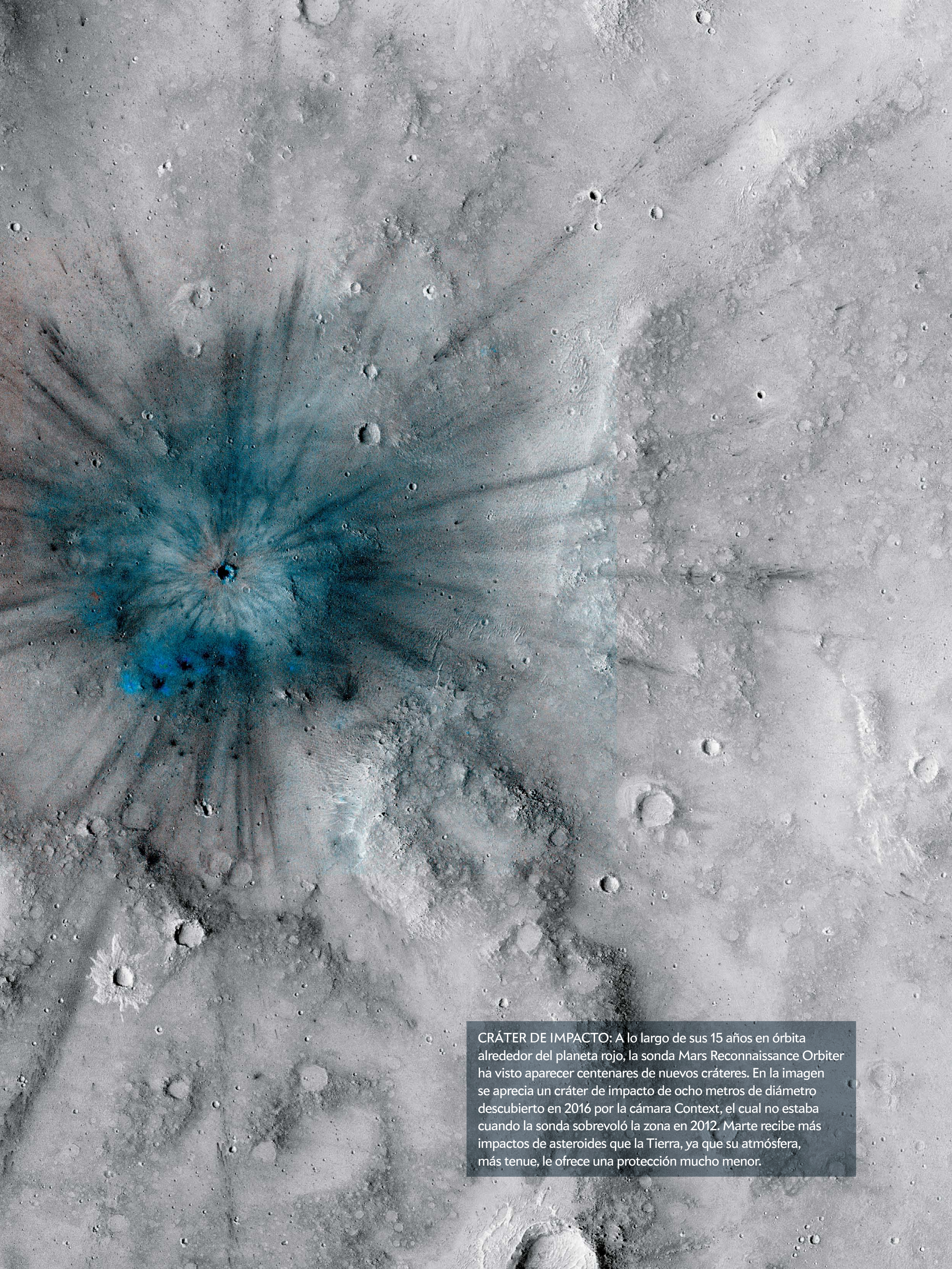
Lloverá en algunos sitios. Philip Newton en *La atmósfera*, colección Temas, n.º 12, 1998.

MARTE

UN PLANETA DINÁMICO

Tras 15 años en órbita, la sonda Mars Reconnaissance Orbiter ha cambiado nuestra visión del planeta rojo

Clara Moskowitz



CRÁTER DE IMPACTO: A lo largo de sus 15 años en órbita alrededor del planeta rojo, la sonda Mars Reconnaissance Orbiter ha visto aparecer centenares de nuevos cráteres. En la imagen se aprecia un cráter de impacto de ocho metros de diámetro descubierto en 2016 por la cámara Context, el cual no estaba cuando la sonda sobrevoló la zona en 2012. Marte recibe más impactos de asteroides que la Tierra, ya que su atmósfera, más tenue, le ofrece una protección mucho menor.

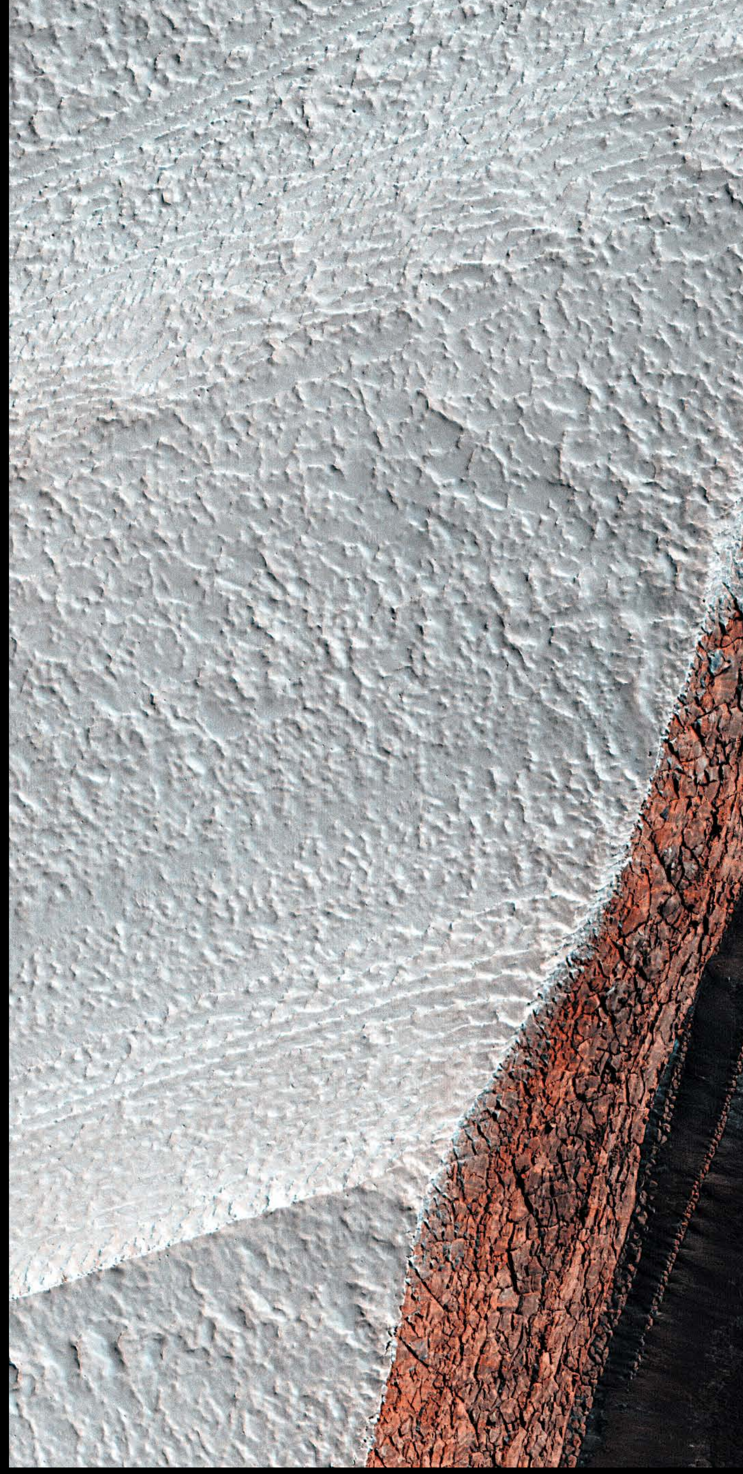


Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American* especializada en física y ciencias del espacio.

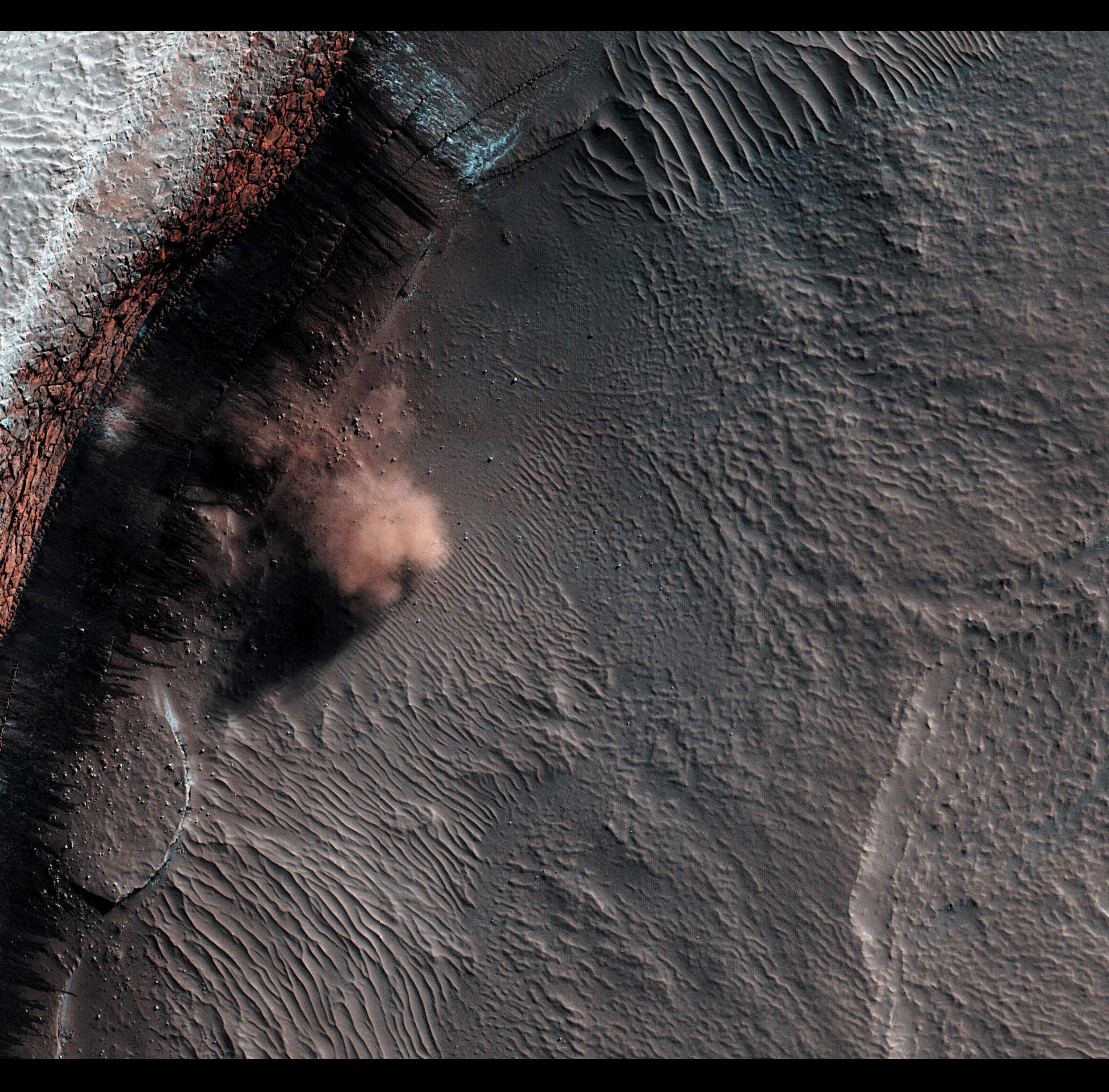
Marte, cuyo paisaje se pensaba estático y polvoriento, se halla en constante cambio. No fue hasta la llegada de la sonda espacial Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), de la NASA, cuando comenzamos a observar dunas movedizas, cambios estacionales y remolinos de polvo por todo el planeta. La sonda ha cumplido hace poco 15 años en órbita alrededor de nuestro mundo vecino, donde ha catalogado una amplia variedad de estructuras geológicas gracias a sus cuatro instrumentos científicos y sus tres cámaras. «Nunca habíamos contado con una resolución tan buena durante un período lo suficientemente largo para observar cambios en la superficie», señala Richard Zurek, científico del proyecto MRO y miembro del Laboratorio de Propulsión a Chorro, en California. «Hoy podemos ver que Marte es un planeta dinámico.»

Con más de 400 terabits de datos transmitidos a la Tierra a lo largo de los años, la sonda, lanzada en 2005, no solo ha referido numerosos hallazgos relativos a la atmósfera y la superficie de Marte, sino también —gracias a su radar— al material subsuperficial del planeta. Asimismo, se ha empleado como satélite de comunicaciones para transmitir mensajes procedentes de los distintos módulos de aterrizaje y robots exploradores que han visitado el suelo marciano durante su permanencia en órbita. Hoy la sonda sigue gozando de buena salud y dispone de combustible suficiente para continuar funcionando durante al menos otros 15 años, siempre y cuando sus instrumentos lo resistan. «Por supuesto, siempre podrán producirse averías inesperadas, como en un coche viejo», apunta Leslie Tamppari, científica adjunta del proyecto MRO y miembro del Laboratorio de Propulsión a Chorro. «Pero esa longevidad nos permitiría ampliar verdaderamente nuestro conocimiento sobre Marte. Hay aspectos que solo podremos dilucidar si disponemos de un largo historial de observaciones de referencia.»

Al mismo tiempo, la sonda ha expuesto la belleza de Marte y ha revelado un mundo alienígena que guarda sorprendentes similitudes con el nuestro. Al igual que muchas de las fotografías del telescopio espacial Hubble y otros observatorios, las imágenes de la MRO no son solo ciencia; son también objetos de arte. Zurek recuerda el día en que Alfred McEwen, investigador principal del Experimento Científico de Imágenes de Alta Resolución (HiRISE), visitó el Laboratorio de Propulsión a Chorro: «En la secretaría le dijeron: "Siga el pasillo y cuando llegue al cuadro impresionista gire a la izquierda". Recorrió el pasillo y vio que el cuadro impresionista era, en realidad, una foto de Marte tomada por su cámara». IyC



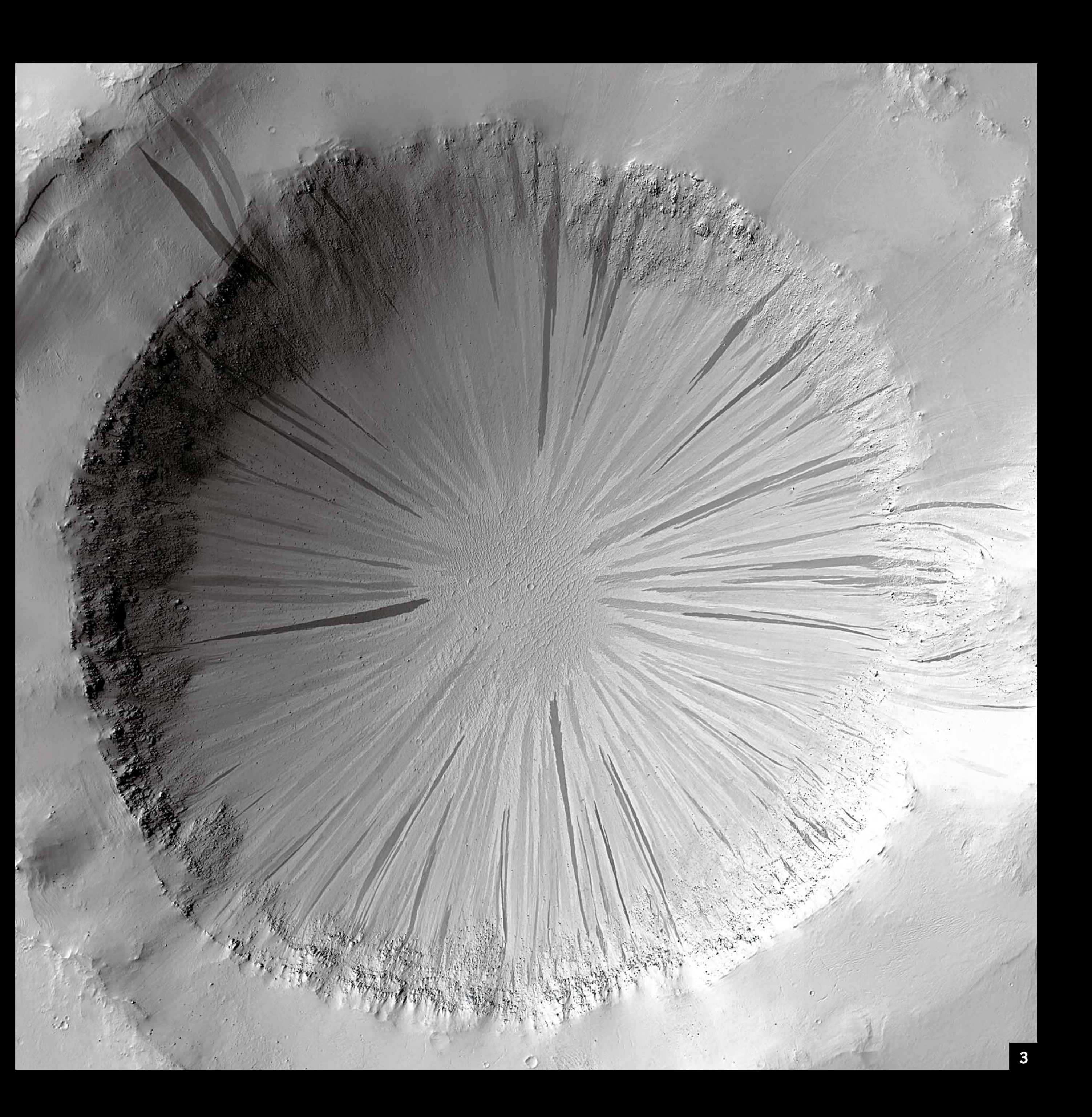
TODAS LAS IMÁGENES: NASA, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL) Y UNIVERSIDAD DE ARIZONA



AVALANCHA POLAR: Una nube de escombros, probablemente formada durante una avalancha, sobrevuela un área del polo norte marciano. La imagen, tomada en 2010 por la cámara del Experimento Científico de Imágenes de Alta Resolución (HiRISE), muestra un abrupto acantilado compuesto por capas de hielo de agua cubiertas por una escarcha blanca y brillante de dióxido de carbono. El fenómeno se observa con frecuencia en cada primavera marciana, lo que sugiere que el polo norte del planeta rojo experimenta una temporada de avalanchas cuando la luz solar y el calor agrietan el hielo formado durante el invierno.

1

2



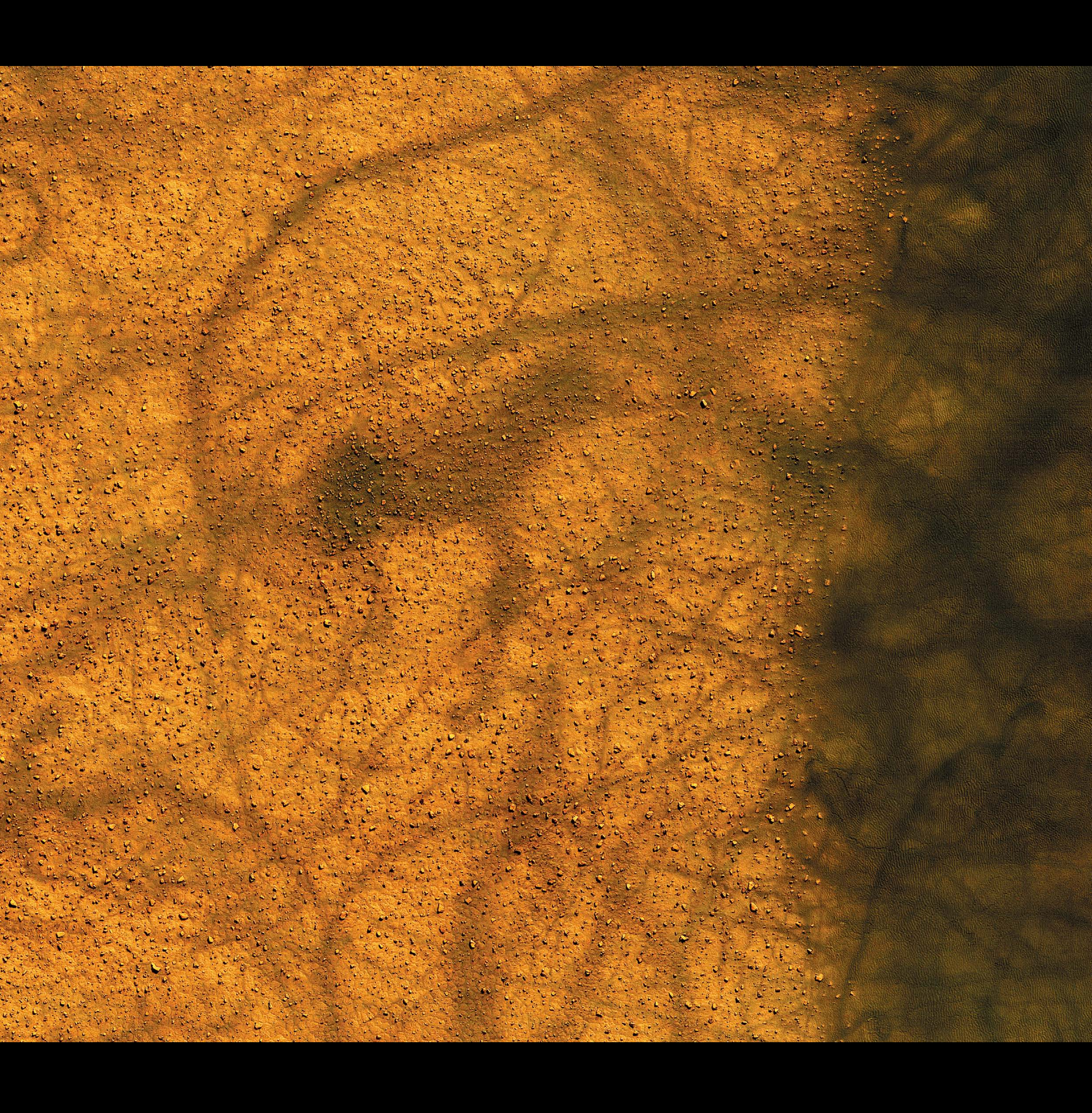
SUPERFICIE CAMBIANTE: Una variedad de asombrosas texturas tapizan la polvorienta superficie de Marte. Sobre las laderas de Nectaris Montes, en el cañón Coprates Chasma, ondulan enormes dunas (*1*). En el cráter Russell (*2*), las dunas se ven surcadas por canales estrechos causados por el deslizamiento de fragmentos de hielo de dióxido de carbono. Los canales oscuros parecen surgir y redistribuirse de forma estacional, por lo que han mostrado trayectorias diferentes cada año que la sonda los ha fotografiado. Las laderas de un cráter situado en la región Arabia Terra (*3*) presentan otro tipo de líneas, originadas cuando el polvo forma aludes que caen por los laterales de la depresión circular.

1

2



DUNAS FAMILIARES: Las crestas de las dunas que se elevan sobre el suelo marciano recuerdan al satén arrugado. Los científicos estudian la morfología de las dunas para entender la geología del planeta rojo. Por ejemplo, algunos de los picos curvados mostrados aquí se asemejan a los barjanes, un tipo de duna que se forma cuando el viento sopla de manera constante en una sola dirección: algo frecuente tanto en los desiertos terrestres como en los marcianos.



REMOLINOS DE POLVO: Un fenómeno meteorológico común a la Tierra y a Marte son los remolinos de polvo, columnas de arena que ascienden en espiral alrededor de una bolsa de aire a baja presión. El de la primera imagen (*1*), captado en 2019 por la cámara HiRISE, se eleva unos 650 metros, tal y como demuestra la longitud de la sombra que se extiende hacia la derecha. Al moverse sobre la superficie marciana y levantar el polvo que encuentran a su paso, los remolinos de polvo trazan serpenteantes surcos oscuros (*2*).

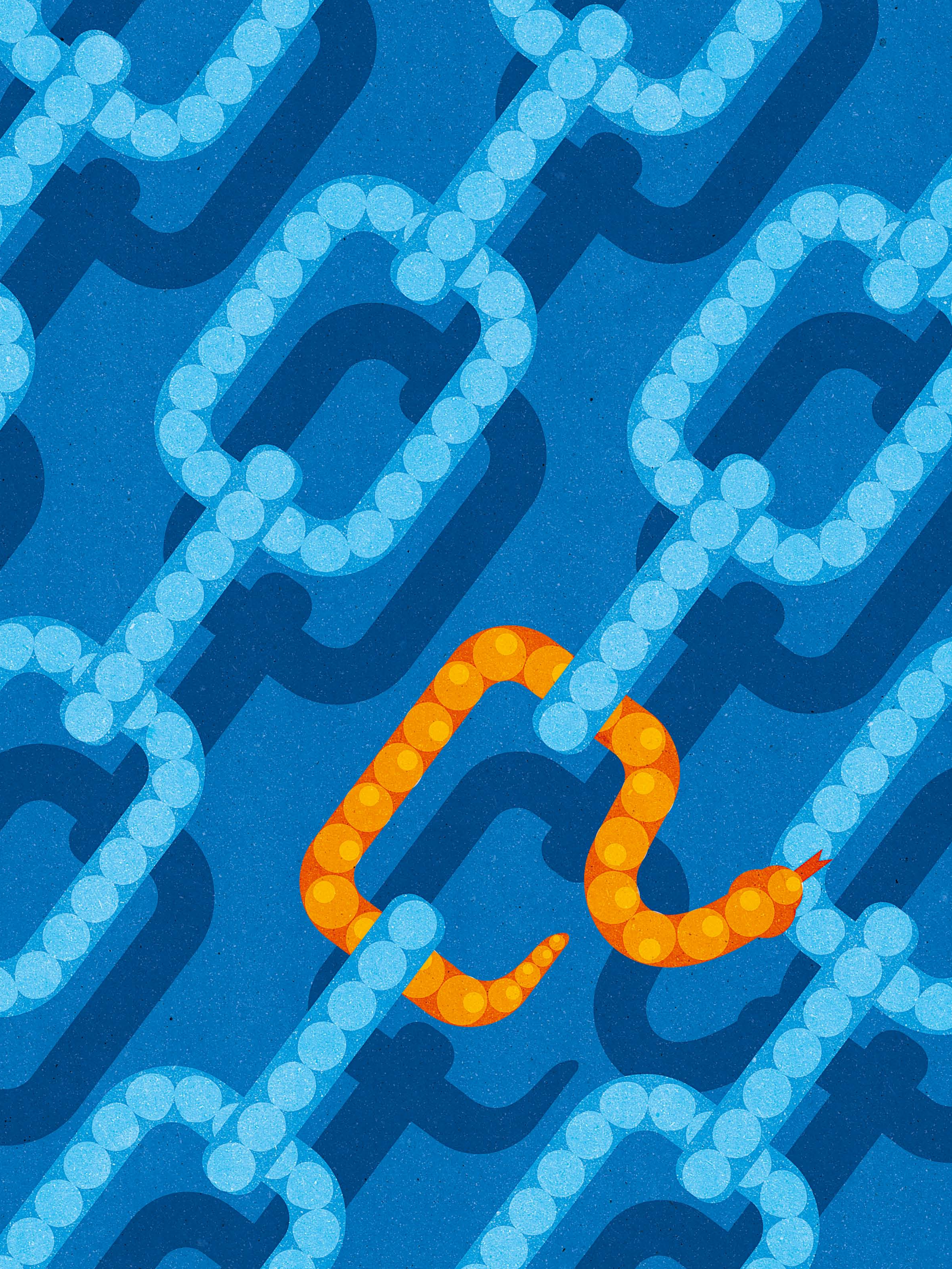
PARA SABER MÁS

Mars Reconnaissance Orbiter. Página web de la NASA sobre la misión. mars.nasa.gov/mro.

EN NUESTRO ARCHIVO

Estudiando el planeta rojo. John P. Grotziger y Ashwin Vasavada en *IyC*, agosto de 2012.

Marte en movimiento. Alfred S. McEwen en *IyC*, julio de 2013.



MEDICINA

LAS CÉLULAS TRAMPOSAS EN EL CÁNCER

En los organismos complejos, las células conviven gracias a la colaboración. Cuando algunas rompen las reglas, aparece el cáncer

Athena Aktipis

Ilustración de Kotryna Zukauskaite

EN SÍNTESIS

En los organismos pluricelulares, la colaboración entre las células en la distribución de los recursos y el intercambio de señales químicas resulta fundamental para la supervivencia.

Pero en ocasiones aparecen células que se aprovechan de la sociedad colaboradora en la que viven. Consiguen eludir los sistemas moleculares de control, monopolizan los nutrientes y se reproducen en exceso, lo que da lugar al cáncer.

El conocimiento detallado de los mecanismos naturales que permiten detectar y desactivar a las transgresoras puede aprovecharse para desarrollar tratamientos contra la enfermedad.

Athena Aktipis es profesora de la Facultad de Psicología de la Universidad Estatal de Arizona. Es jefa de proyecto en el Centro de Cáncer y Evolución de dicha universidad y codirectora del Proyecto de Generosidad Humana, de carácter pluriinstitucional. Ha escrito el libro *The cheating cell: How evolution helps us understand and treat cancer* (Princeton University Press, 2020).



LA BALLENA JOROBADA ES UNO DE LOS ANIMALES MÁS GRANDES QUE HAN EXISTIDO jamás en este planeta. En realidad, está constituida por una sociedad gigantesca de billones de células que colaboran entre sí. Los distintos tipos de células se ocupan de la alimentación, la respiración, la natación, la reproducción, la interacción con otros animales y todas las funciones necesarias para que el cetáceo sobreviva y prospere. Un elefante, una persona o incluso un cactus saguaro entrañan una civilización celular que funciona igual de bien.

Los organismos pluricelulares evolucionaron en un principio porque las células que colaboraban entre sí poseían ventajas sobre las solitarias, como las bacterias unicelulares. Compartir recursos permitió a las formas de vida aumentar de tamaño —lo que las ayudó a hacer frente a los depredadores—, puesto que los nutrientes y las señales químicas que precisaban las células podían transportarse por todo el cuerpo. La división de las tareas hizo posible que las células se especializaran y formaran partes útiles, como el estómago o las patas. Y el trabajo en equipo les confirió la capacidad de mantener un entorno extracelular saludable en el que podían vivir más tiempo.

Pero la colaboración es una empresa delicada. En la vida pluricelular pueden medrar los tramposos. Al acaparar recursos, se replican con más rapidez que los cumplidores y toman el control, a menos que existan mecanismos que velen por la colaboración. Las células díscolas se aprovechan de la sociedad celular colaboradora en la que viven, se reproducen en exceso, monopolizan los nutrientes y alteran la armonía que necesitan los organismos pluricelulares para ser viables. Esta deslealtad celular es lo que conocemos como cáncer.

Las células cancerosas rompen las reglas que rigen a las demás. Se dividen cuando no toca, no mueren cuando corresponde, privan a otras de los suministros esenciales, eluden sus propias funciones y contaminan el espacio extracelular. Mientras que las células colaboradoras ponen freno al desarrollo y la proliferación excesivos, las cancerosas a menudo evaden las señales que inhiben el crecimiento. Las primeras tienen una vida limitada, en tanto que las segundas se resisten a la muerte celular y se ocultan del sistema inmunitario para que no las destruya. Las células normales distribuyen los nutrientes y las señales químicas esenciales para la supervivencia; en cambio, las cancerosas forman vasos sanguíneos adicionales que les surten de más recursos. Tales contrastes ponen de manifiesto que hacer trampa no es una mera metáfora del cáncer, sino una descripción de su realidad celular.

Esta perspectiva de la evolución y la colaboración aporta nuevos conocimientos sobre el proceso por el que se produce el cáncer, y también explica por qué no lo hace. Los animales enormes, como la ballena y el elefante, rara vez lo padecen a pesar de estar formados por infinidad de células que podrían descarriarse. ¿Por qué? Varios investigadores, incluido nuestro equipo del Centro sobre la Evolución del Cáncer de la Universidad Estatal de Arizona, han examinado los genomas de estos animales y han descubierto que contienen numerosas copias de los genes encargados de destruir las células que mutan y producen proteínas anómalas, un signo del cáncer. Dichos animales también poseen copias adicionales de los genes que desencadenan la reparación del ADN. Esos genes son, en esencia, la policía de la colaboración. Uno de ellos, llamado *TP53*, se ha catalogado como supresor del cáncer en los humanos; pero, a diferencia de los animales gigantes, nosotros solo tenemos dos copias y, como era de esperar, somos más propensos a las neoplasias malignas. Los científicos intentan ahora convertir en tratamientos las acciones de estos genes y buscan otros parecidos en toda la extensión del árbol de la vida. Los oncólogos incluso han comenzado a utilizar principios evolutivos para diseñar quimioterapias que protejan a las células menos agresivas y egoístas de los tumores emergentes para reducir así la malignidad del cáncer.

LA ESTRATEGIA DE LA COLABORACIÓN

La primera vez que me interesé por la interacción evolutiva entre los comportamientos de colaboración y engaño fue durante mis estudios de grado y posgrado en psicología. Por entonces desarrollaba programas informáticos para examinar los efectos de distintas estrategias en poblaciones hipotéticas, como los nodos en una red. Por lo general, en estos modelos, que carecen de fuerzas compensatorias que los controlen (como el parentesco genético o las normas sociales de reciprocidad), los tramposos superan a los cooperadores. Al principio intentaba comprender qué contribuye a mantener estable la colaboración en las sociedades humanas. Pero luego comencé a conocer las bases biológicas del cáncer y el comportamiento de las células cancerosas, y se hizo patente que muchas de sus actividades sugerían una ruptura de la colaboración en un sistema pluricelular. El cáncer, que me había parecido una enfermedad absurda, en la que un organismo se autodestruye, empezó a cobrar sentido.

Al investigar en profundidad, descubrí que la desobediencia celular se manifiesta en forma de cáncer y fenómenos similares en un sinnúmero de organismos complejos, desde huma-

nos hasta almejas y cactus. Las plantas, por ejemplo, presentan protuberancias seudotumorales llamadas fasciaciones. Uno de los casos más llamativos es el de los cactus crestados. El cactus saguaro experimenta mutaciones en las células meristemáticas (equivalentes a las células madre en los animales) en las zonas de crecimiento de la planta. Como consecuencia, las células proliferan en grandes cantidades y dan lugar a excrecencias que se abren en forma de crestas. Las fasciaciones, de gran belleza, a veces pasan factura, igual que el cáncer en las personas. Los cactus crestados sufren a menudo alteraciones de la floración, lo que afecta a su reproducción, y son más vulnerables a las enfermedades y los daños.

Me percaté de que muchas de estas alteraciones en la colaboración celular guardaban un parecido asombroso con las características del cáncer, una idea concebida por los oncobiólogos para describir las tendencias generales de las neoplasias malignas. Entre las características figura, además de la proliferación excesiva, la invasión de otros tejidos que, examinada desde el punto de vista evolutivo, parece deberse a la falta de colaboración celular. Cuando las células cancerosas sobreexplotan los recursos de su alrededor (produciendo enzimas que digieren el tejido cercano, por ejemplo), el proceso a menudo destruye su entorno celular normal. En ecología, los organismos que agotan los recursos locales experimentan una mayor presión para desarrollar la capacidad de desplazarse a través de la dispersión.

Las células neoplásicas responden a esa misma presión para moverse. Un modelo de cáncer que creé demostró que unas tasas elevadas de consumo de recursos celulares se traducían en la evolución de células con mayor propensión a desplazarse, un descubrimiento que publiqué con mis colaboradores en *Cancer Prevention Research* en 2012. Llegamos a la conclusión de que esa sobreutilización de recursos sería uno de los factores que impulsa al cáncer a metastatizar o diseminarse. Incluso antes de que se produzca la invasión de otros tejidos, la degradación de los recursos propiciaría que las células cancerosas adquirieran la capacidad de moverse dentro de los tumores.

Esta perspectiva ecológica y evolutiva pone de relieve nuevas formas de detectar las células tumorales, aparte de otros rasgos típicos, como la replicación excesiva. En un artículo que publicamos en *Nature Reviews Cancer* en 2017 junto con el biólogo Carlo Maley y otros colaboradores de la Universidad Estatal de Arizona, propusimos que se investigaran aquellas células que no regularan bien ciertos aspectos de su comportamiento, entre ellos el consumo acelerado de recursos o la producción de proteínas y enzimas que dañen su entorno.



JOHN CANCALOSI, ALAMY

LAS PROTUBERANCIAS SEUDOTUMORALES en los ápices de los cactus saguaros, llamadas fasciaciones, son el resultado de un crecimiento celular anómalo. Las crestas aumentan la vulnerabilidad de la planta ante las enfermedades.

INTERCEPTAR A LAS TRAMPOSAS

La colaboración en el interior de un organismo pluricelular no consiste solo en unas células que reprimen la actividad excesiva. También precisa de otras que se encarguen de detectar y suprimir las infracciones que se produzcan. Los organismos han desarrollado formas de llevarlo a cabo. Así, en circunstancias normales, las células solo se multiplican con el «permiso» de sus vecinas, que desencadenan la liberación de señales de crecimiento. Y si alguna célula se aparta del guion pluricelular establecido, otras cercanas o el sistema inmunitario la destruyen.

Las células cancerosas también engañan a los centinelas que tienen en su propio genoma. Uno de ellos es el gen supresor del cáncer *TP53*. Codifica la proteína p53, que ejerce un papel clave en diversos aspectos del control de las células, desde la detención del ciclo celular y el inicio de la reparación del ADN hasta la activación de la apoptosis (muerte celular controlada) si el daño es irremediable. Nuestra fuerza policial también cuenta con el *BRCA*, un gen crucial para la reparación del ADN; cuando muta y es incapaz de desempeñar su función normal, el *BRCA* aumenta el riesgo de cáncer de mama, de ovario y de próstata.

Los genes de la familia del *TP53* (entre los que también se incluyen el *TP63* y el *TP73*, que ayudan a mantener la integridad del genoma) evolucionaron muy pronto en los organismos pluricelulares. Aparecieron en seres primitivos, como las anémonas de mar, y ofrecieron una ventaja de supervivencia que les permitió extenderse después por todo el árbol de la vida pluricelular. En 2019, Anna Trigos y su equipo del Centro de Cáncer Peter MacCallum, en Australia, observaron que las mutaciones frecuentes en el cáncer afectan sobre todo a las vías de transmisión de señales en las que intervienen genes como el *TP53*. Además, constataron una pérdida de comunicación entre estos genes reguladores (que evolucionaron incluso antes que la propia pluricelularidad) y los que se originaron para mantener los comportamientos celulares egoístas bajo control durante la transición a la pluricelularidad. Los científicos calcularon la antigüedad de los genes mediante filoestratigrafía, una técnica que compara las características de los genes de organismos actuales para determinar un posible ancestro común y que, en última instancia, muestra dónde y cuándo surgieron en el árbol evolutivo de la vida. Luego examinaron las mutaciones en los tumores de más de 9000 pacientes y descubrieron que los genes que intervienen en la regulación de la colaboración pluricelular a menudo estaban alterados.

¿Cómo detectan las transgresiones los genes como el *TP53*? Al parecer, recaban información sobre la actividad celular. Reciben

señales procedentes de otra parte de la célula y de otras zonas del genoma, que indican, por ejemplo, un mayor número de mutaciones o un aumento en la producción de proteínas anómalas. Es muy probable que esas señales indiquen que la célula ya no colabora adecuadamente con el organismo pluricelular. Desencadenan entonces la acción del *TP53* y de genes similares, que detienen el ciclo de replicación celular e inician la reparación del ADN. Si esas medidas son insuficientes, los genes inducen la apoptosis para proteger al organismo de la amenaza que le podría suponer la célula en cuestión.

En los humanos, las dos copias del *TP53* provienen de nuestros progenitores: una de la madre y otra del padre. Si una de ellas sufre una mutación, el riesgo general de cáncer a lo largo de la vida es mucho mayor. Las personas con una enfermedad muy infrecuente llamada síndrome de Li-Fraumeni heredan solo una copia del *TP53*, por lo que son sumamente propensas al cáncer.

Los elefantes, en cambio, poseen 40 copias de su versión del *TP53* (el *EP53*), y varios científicos, entre los que me cuento, creemos que ello explica por qué los animales gigantes rara vez padecen cáncer. El hecho de que no lo sufran ha constituido desde hace tiempo un enigma oncológico conocido como paradoja de Peto. En 1977, el epidemiólogo de la Universidad de Oxford Richard Peto y sus colaboradores plantearon que los organismos de mayor tamaño (y de vida más larga) deberían de presentar más cáncer que los de menores dimensiones, por cuanto los primeros poseen más células y, en buena lógica, más posibilidades de mutaciones malignas. Sin embargo, en sus investigaciones observaron que el riesgo de cáncer y el tamaño corporal no se correspondían. En un estudio publicado en 2017, así como en trabajos aún no concluidos, nuestro grupo ha comprobado que esta paradoja existe en todo el reino animal. Creamos una gran base de datos de registros de zoológicos y de laboratorios de anatomía patológica veterinaria, de la que se desprendía que las tasas de cáncer en las especies más voluminosas y longevas y en las más pequeñas y de vida más corta eran prácticamente iguales; nuestro análisis en curso ha revelado más casos de esta tendencia.

En nuestra opinión, ello indica que los organismos grandes y longevos están dotados de mecanismos especialmente buenos para reprimir a las células transgresoras, como son las copias adicionales de *EP53*. Los genetistas evolutivos han comparado genomas de elefantes con genomas reconstruidos de varias especies emparentadas (el mamut lanudo, por citar una) y han descubierto que, a medida que los animales de este linaje se iban volviendo más voluminosos, iban sumando copias de genes similares al *TP53*. Tal repetición denota el importante papel de los genes en la evolución del tamaño corporal grande. Este ayudaba a los elefantes y sus parientes a sobrevivir a los depredadores, mientras que los genes oncosupresores los ayudaban a hacer frente a sus propias células no colaboradoras.

Parece vislumbrarse una pauta. Muchas veces en la historia de la vida han surgido cuerpos gigantes, tanto en la tierra como en el mar, y, con ellos, los genes que controlan a los tramposos. En concreto, entre los cetáceos (el grupo taxonómico al que pertenecen los delfines y las ballenas) la variación del tamaño corporal es considerable. La ballena jorobada es unas cuatro veces mayor que la minke común, estrechamente emparentada con ella; y la orca, hasta 20 veces mayor que el delfín mular, su pariente cercano. Y, en este grupo, la cantidad de genes que controlan la colaboración celular se incrementa con el tamaño corporal. Miembros de nuestro equipo, al examinar en detalle

los genomas de las ballenas jorobadas, hallaron duplicaciones de los genes que intervienen en la apoptosis, el proceso por el que las células reconocen que ya no pueden funcionar bien y se «suicidan». Los cetáceos más pequeños no tienen tantas copias de esos genes. En las grandes ballenas, nuestro grupo también halló pruebas de selección evolutiva en una serie de genes oncosupresores, como los implicados en el control del ciclo celular, en la transmisión de señales y en la proliferación. Uno de ellos, el *PRDM2*^{T}, regula la expresión de la versión cetácea del *TP53*, lo que demuestra, una vez más, la función cardinal de esa secuencia concreta de ADN.

Detener a los incumplidores no es tarea fácil, porque, paradójicamente, las células malignas que dejan de colaborar con las normales empiezan a cooperar entre ellas, lo que agrava la situación. Así, las células cancerosas producen factores de crecimiento tumoral que estimulan a sus semejantes. También las protegen mediante la producción de moléculas que las ocultan, de modo que dificultan al sistema inmunitario la tarea de detectarlas. Los modelos informáticos de poblaciones celulares en el organismo creados por mi grupo muestran el desarrollo de este tipo de colaboración neoplásica, que es más probable en caso de interacción de las células cancerosas con sus clones genéticos, lo que ocurre a menudo en los tumores. La colaboración entre los infractores de las reglas impulsa su capacidad para metastatizar y lograr invadir otros tejidos. Las células cancerosas son capaces de desplazarse en grupo, en el que se comunican mediante señales eléctricas y químicas, formando a veces una larga línea de células que se abre camino hacia otras partes del cuerpo. Un estudio reveló que las células tumorales en la sangre que constituyen grupos tienen entre 23 y 50 veces más probabilidades de generar metástasis que las que se hallan aisladas.

FOMENTAR LA DETECCIÓN NATURAL

Si bien la colaboración entre las células cancerosas parece cosa de pesadilla, conocer su mecanismo nos permite idear nuevas formas de detenerlas, aun cuando actúen aliadas. Podríamos, por ejemplo, fortalecer nuestro sistema natural de detección de las transgresiones. Una de las líneas de investigación actuales de nuestro grupo se centra en hallar tratamientos antitumorales a partir de los abundantes genes *EP53* de los elefantes. En el tubo de ensayo, el empalme de *EP53* en el genoma de células obtenidas de osteosarcomas humanos y caninos ha logrado restaurar las funciones deterioradas de la p53. La adición de *EP53* mejoró la respuesta de apoptosis habitual que ayuda a proteger al organismo de las células cancerosas. Otra área terapéutica interesante son los inhibidores de los puntos de control inmunitario. Estos medicamentos bloquean la capacidad de las células cancerosas para enviar señales engañosas al sistema inmunitario (señales que ocultan su creciente comportamiento traicionero



GEORGE KARBUS, GETTY IMAGES

CON MÁS CÉLULAS EN EL CUERPO, el riesgo de cáncer debería aumentar, pero las ballenas jorobadas gigantes poseen numerosos genes que suprimen la enfermedad.

y han demostrado cierta eficacia en el tratamiento de tumores como el melanoma).

Un enfoque distinto, la llamada terapia adaptativa, intenta debilitar los grupos de células cancerosas conservando en su interior algunas que aún no han dejado de colaborar por completo. En lugar de bombardear el tumor con grandes dosis de quimioterapia —una táctica que en última instancia favorece la evolución de células que no responden a los medicamentos, al igual que la aplicación constante de pesticidas en los cultivos produce insectos resistentes a estos productos—, los oncólogos han intentado una estrategia más moderada. Administran solo la quimioterapia suficiente para que el tumor quede circunscrito. Permitir que las células sensibles a los medicamentos sobrevivan y compitan por los recursos con las resistentes puede mantener a raya a esta última población. En los primeros ensayos clínicos en pacientes con cáncer de próstata de gran malignidad, dicho método mantuvo los tumores bajo control durante al menos 34 meses, en comparación con los aproximadamente 13 del tratamiento estándar. Estos estudios todavía se hallan en marcha.

Y puesto que la colaboración entre tramposos, un retorcido honor entre ladrones, parece ser una estrategia importante entre las células cancerosas, en un artículo hemos planteado que se podrían bloquear las moléculas que estas se intercambian cuando se comunican para fomentar el crecimiento o la formación de nuevos vasos sanguíneos que abastezcan a los tumores. Así les resultaría más difícil trabajar juntas. Dada la capacidad de los grupos de células para invadir y metastatizar con mayor eficacia, frenar las moléculas de las que se sirven para adherirse unas a otras podría convertirse en el futuro en otro método de tratamiento. Los pacientes con niveles altos de placoglobinas, unas proteínas adherentes, presentan más metástasis y unas tasas de supervivencia más bajas, lo que aconseja investigarlas como dianas terapéuticas.

La vida social de las células cancerosas en el organismo es mucho más compleja de lo que podíamos imaginarnos. Pero las células sanas normales son posiblemente incluso más refinadas, y albergan en su interior multitud de armas contra las rebeldes. No solo somos bastiones de la colaboración celular: todas y cada una de nuestras células contienen una compleja red genética capaz de detectar y responder a los intentos de quebrantarla. Después de todo, somos descendientes de una línea de ancestros pluricelulares que contuvieron el cáncer el tiempo suficiente para reproducirse y transmitir estos caracteres a sus vástagos.

En el panorama general de la evolución de la vida, la colaboración celular ha tenido un gran éxito pese a la persistencia de células díscolas. El cáncer rompe las reglas del organismo, pero nosotros, junto con las ballenas y todas las demás formas de vida pluricelular de este planeta, perfeccionadas por miles de millones de años de selección natural, poseemos las herramientas para restablecer la coexistencia pacífica. IyC

PARA SABER MÁS

Cancer across the tree of life: Cooperation and cheating in multicellularity. C. Athena Aktipis et al. en *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 370, artículo n.º 20140219, julio de 2015.

Classifying the evolutionary and ecological features of neoplasms. Carlo C. Maley et al. en *Nature Reviews Cancer*, vol. 17, págs. 605-619, septiembre de 2017.

Somatic mutations in early metazoan genes disrupt regulatory links between unicellular and multicellular genes in cancer. Anna S. Trigos en *eLife*, vol. 8, artículo n.º e40947, febrero de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las ecuaciones del cáncer. Guillermo Lorenzo, Guillermo Vilanova y Héctor Gómez en *IyC*, abril de 2017.

El árbol darwiniano del cáncer. Jeffrey P. Townsend en *IyC*, junio de 2018.

Control darwiniano del cáncer. James DeGregori y Robert Gatenby en *IyC*, agosto de 2019.


EL HIMALAYA domina el paisaje nepalí.

RECURSOS NATURALES

AGUA DE MONTAÑA

Datos procedentes de las montañas más altas de la Tierra indican cambios en las reservas de agua que abastecen a dos mil millones de personas

Walter Immerzeel



Walter Immerzeel es profesor de geografía física en la Universidad de Utrecht, donde dirige el grupo de hidrología de montaña. Ha vivido en Nepal y lleva desde 2002 tomando datos de nieve y hielo en el Himalaya.

LAS NOCHES SE HACEN LARGAS EN EL INTERIOR DE UNA TIENDA DE CAMPAÑA SITUADA A 5300 metros sobre el nivel del mar, en el frente del glaciar Yala, en Nepal. A las 20:00, tras cenar *dal bhat* nepalí (lentejas y arroz), los diez miembros de nuestra expedición se guarecen del frío en sus sacos de dormir, dentro de las pequeñas tiendas que componen nuestro campamento temporal. Cuesta conciliar el sueño porque la baja concentración de oxígeno incrementa la frecuencia cardíaca. Como resultado, paso las horas nocturnas escuchando el eco lejano de atronadoras avalanchas y los crujidos del hielo, mientras sopeso la idea de salir fuera a orinar y repaso lo que no debo olvidar al día siguiente. Nada más amanecer, el campamento se pone en marcha y comenzamos a ascender el escarpado glaciar con el fin de instalar instrumentos especiales a 5600 metros.

Nuestro equipo (que incluye a miembros del Centro Internacional para el Desarrollo Integral de las Montañas, con sede en Nepal) realiza expediciones semestrales en esta región, conocida como cuenca de Langtang, desde 2012. Hemos instalado estaciones meteorológicas automatizadas en el campamento base y en puntos más elevados para medir las precipitaciones, la profundidad de la nieve, la radiación, la temperatura, la humedad relativa y el viento, lo que convierte a Langtang en una de las cuencas de gran altitud mejor estudiadas de Asia. Tenemos que visitar las estaciones cada seis meses para revisar los instrumentos y descargar los datos: no hay una red móvil que permita transmitir las medidas de forma automática y las montañas bloquean las señales de los satélites. En este ascenso, instalaremos nuevos dispositivos en una estructura metálica de tres metros de altura que clavaremos en el hielo. Esos sensores registrarán datos de temperatura y vapor 10 veces por segundo para medir la sublimación (la transición directa de hielo a vapor de agua).

Esas expediciones nos permiten reunir la información necesaria para comprender el ciclo del agua en cotas elevadas: la nieve cae en la cima de las montañas y se va convirtiendo en hielo glaciar, que se desliza lentamente ladera abajo hasta fundirse. El agua desciende y confluye en ríos cada vez mayores que abastecen a numerosos pueblos de montaña, así como a terrazas agrícolas, centrales hidroeléctricas, bosques, campos de cultivo en el valle y grandes ciudades e industrias situadas más abajo. Al principio no sabíamos demasiado sobre el ciclo hidrológico en zonas de alta montaña. Ignorábamos qué cantidad de lluvia y nieve caía, cuánta agua entraba y salía del manto de nieve o por qué los glaciares cubiertos de rocas desprendidas por la erosión de las laderas circundantes parecían fundirse tan rápido como los que carecían de tales escombros. Necesitamos conocer esos detalles para determinar cuánta agua fluye desde el manto de nieve y los glaciares, y cómo podrían variar en el futuro el volumen y la temporalidad de ese flujo.

Langtang es una pequeña cuenca fluvial que drena varios picos y glaciares. Alimenta al río Trishuli, una importante fuente de agua para las presas hidroeléctricas construidas recientemente a mitad de montaña y los campos de regadío situados aún más abajo. Tras recorrer cientos de kilómetros, el caudal acumulado desemboca en el delta del Ganges, cuyas aguas se vierten en el golfo de Bengala, al este de la India, y abastecen a 400 millones de personas. En el Himalaya hay centenares de cuencas similares a la de Langtang.

Muchas otras cordilleras, como los Alpes, los Andes y las Montañas Rocosas, presentan la misma dinámica. Un estudio que publicamos en *Nature* en diciembre de 2019 reveló que 78 de esas «torres de agua», desde la cuenca del Tarim en China hasta la Puna de Perú, suministran la mayor parte del agua dulce que usan casi dos mil millones de personas de todo el mundo. Los modelos informáticos muestran que el cambio climático podría poner en peligro esas cruciales reservas de agua. Las variaciones de temperatura, los regímenes de precipitaciones, la acumulación y fusión de la nieve, y la distribución de partículas en suspensión permiten determinar cuánta agua desciende. Sin embargo, la mayoría de los planes relacionados con el cambio climático y la sostenibilidad pasan por alto la función que desempeña el agua de las montañas. Ahora que hemos estudiado de manera sistemática las principales torres de agua del planeta, eso podría empezar a cambiar.

MONZONES Y MONTAÑAS

Las montañas actúan como torres de agua porque en cotas elevadas llueve y nieva más que en los terrenos circundantes más

EN SÍNTESIS

Las grandes montañas del planeta suministran agua a miles de millones de personas, pero son vulnerables frente al cambio climático, el aumento demográfico y el crecimiento económico.

Estudiar el ciclo hidrológico de las regiones montañosas permite comprender la verdadera importancia de esas reservas de agua y determinar las variaciones que podrían sufrir en el futuro.

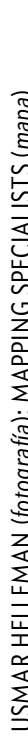
Los políticos deberían tomar conciencia del papel fundamental que desempeña el agua de las montañas y comenzar a actuar ya para preservarla.

PÁGINAS ANTERIORES: SUSAN HALE THOMAS





UN GRUPO DE CIENTÍFICOS instala una estación meteorológica en el glaciar Yala del Himalaya nepalí, a 5600 metros de altitud, para determinar cómo se acumula y se funde la nieve. El agua de deshielo desciende y va confluyendo en ríos cada vez mayores que suministran agua a granjas, presas hidroeléctricas y millones de personas en su camino hacia el delta del Ganges y el golfo de Bengala.



bajos, y porque gran parte de esas precipitaciones se almacenan temporalmente en forma de nieve y hielo glaciar. La nieve y el hielo se derriten de forma lenta pero constante, por lo que representan un suministro de agua fiable y predecible que actúa como amortiguador natural durante los períodos secos.

El agua almacenada en lo alto de las montañas de Nepal es crucial para las personas que viven más abajo, porque los vientos monzónicos que soplan entre junio y septiembre proporcionan entre el 70 y el 80 por ciento de las precipitaciones anuales en el Himalaya [*véase* «Los monzones», por Peter J. Webster; Investigación y Ciencia, octubre de 1981]. Los datos de nuestras estaciones meteorológicas, junto con los modelos, muestran la interacción de los monzones con las montañas. Incluso en una cuenca pequeña como la de Langtang, las lluvias varían de manera notable. El valle gana altura de oeste a este, y gran parte del aire cálido y húmedo deja precipitaciones entre la entrada del valle, a unos 1350 metros de altitud, y el pueblo de Lama Hotel, a 2480 metros. En ese punto, el más húmedo del valle, hemos registrado unos 250 centímetros de lluvias anuales. Sin embargo, si nos movemos tan solo 15 kilómetros más hacia el este, hasta la población de Kyanjin, situada a 3900 metros, medimos unos 80 centímetros de lluvias anuales: es una zona tres veces más seca, pese a su cercanía.

La posición y la forma de las montañas crean otros efectos locales. Si ascendemos de Kyanjin al glaciar Yala, a 5300 metros de altitud, las precipitaciones vuelven a aumentar en un 40 por ciento de media. En conjunto, los procesos a escala grande, mediana y del valle determinan la distribución de lluvia y nieve en toda la región. Y si, por ejemplo, casi todas las precipitaciones caen en forma de lluvia y en cotas bajas, los ríos fluyen de un modo distinto a como lo harían si dichas precipitaciones se produjeran en forma de nieve y a mayor altitud.

Para comprender la dinámica de las torres de agua, hemos investigado en detalle la cantidad de agua almacenada en el manto de nieve cercano al glaciar Yala. Esa cantidad se conoce como equivalente en agua de la nieve y depende de cuánta nieve cae, cuánta se derrite y se vuelve a congelar, cuánta se sublima y cuánta es repartida por el viento. Los instrumentos de nuestro campamento base, a 5300 metros de altitud, miden muchas de esas variables. Las condiciones pueden ser severas: el frío extremo ha hecho que exploten las baterías, los fuertes vientos han torcido algunos sensores y las avalanchas han derribado las estructuras que sujetan los instrumentos.

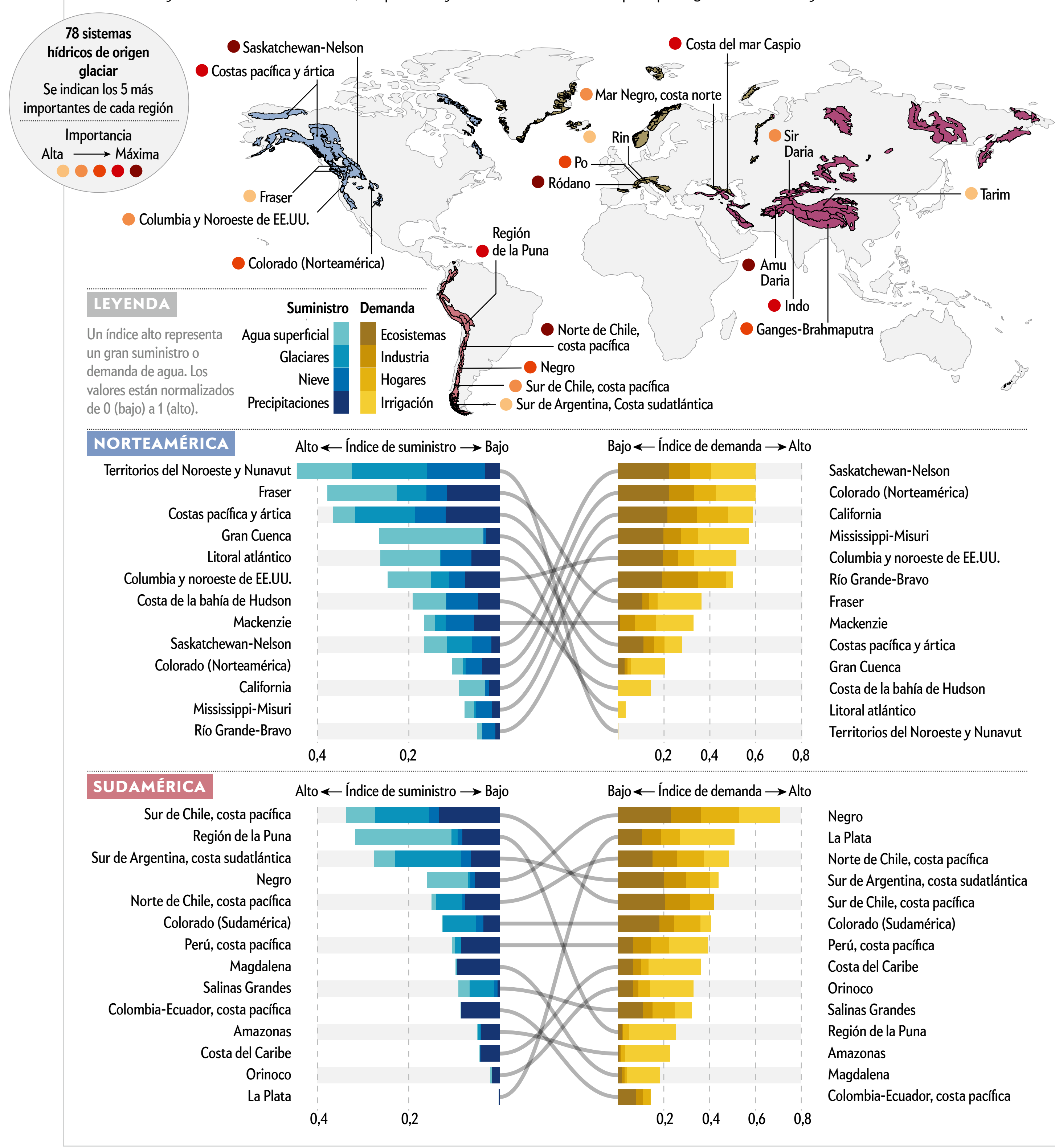
Medir la sublimación, un proceso turbulento que ocurre en las condiciones frías, soleadas, ventosas y secas que imperan en los inviernos del Himalaya, resulta especialmente difícil. Los instrumentos que hemos instalado a 5600 metros cuantifican la sublimación a partir de las variaciones de la humedad y la temperatura atmosféricas. Hemos descubierto que, en las áreas expuestas al viento, cerca del 21 por ciento de la nieve nunca va a parar a ningún río, porque se sublima y pasa a la atmósfera. Este fenómeno sugiere que el manto de nieve puede menguar incluso a temperaturas muy inferiores a cero grados Celsius.

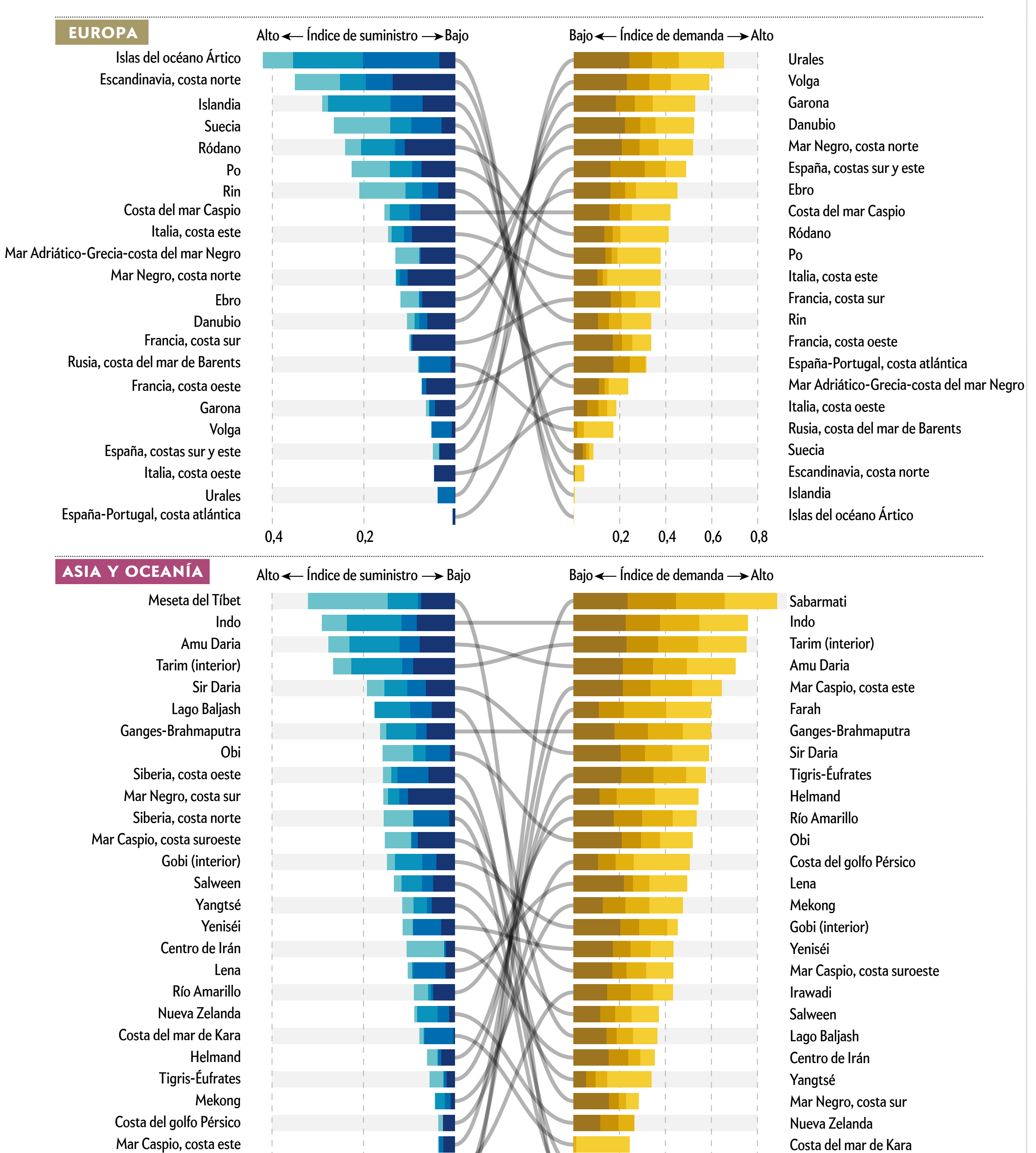
También hemos observado que, cuando la temperatura del aire a dos metros del suelo es negativa, la superficie de la nieve posee suficiente energía para derretirse. Esa energía es el resultado neto de la radiación de onda corta del Sol, la radiación de

Continúa en la página 84

Montañas que riegan el mundo

El hielo, la nieve y la lluvia de 78 cadenas montañosas regionales, o «torres de agua», abastecen de agua a casi dos mil millones de personas y a los ecosistemas circundantes. Clasificar las torres de cada continente revela las más importantes, aquellas que proporcionan grandes cantidades de agua a mucha gente. Las torres más vitales también son las más vulnerables ante el cambio climático, el aumento demográfico y el crecimiento económico, lo que subraya la necesidad de actuar para proteger el suministro y reducir la demanda.





FUENTE: «IMPORTANCE AND VULNERABILITY OF THE WORLD'S WATER TOWERS», POR W. IMMERZEEL ET AL. EN *NATURE*, VOL. 577, PÁGS. 364-369, ENERO DE 2020; PITCH INTERACTIVE (*gráfico*)

Viene de la página 81
onda larga emitida por la superficie y la atmósfera, y los flujos turbulentos de calor. En el interior del manto de nieve también tienen lugar procesos interesantes. Al menos un 30 por ciento de la nieve que se funde durante el día vuelve a congelarse por la noche, de modo que para derretir el manto de nieve hace falta mucha más energía de la que cabría esperar a partir de su masa.

Otro instrumento instalado sobre la nieve mide los cambios en la radiación gamma, que usamos como indicador del equivalente en agua de la nieve. La roca subyacente emite rayos gamma de forma natural y la atenuación de la señal guarda relación con la cantidad de agua almacenada en el manto de nieve.

En ocasiones hemos dado con formas inesperadas de obtener información. Hace unos ocho años, un colaborador que trabajaba en Tasmania usó drones para reunir datos interesantes sobre el volumen y la velocidad de un deslizamiento de tierra. Nos percatamos de que podíamos emplear ese mismo método para estudiar los glaciares cubiertos de escombros, a los que resulta más difícil acceder, y en 2013 realizamos nuestro primer intento en la lengua glaciar situada sobre Kyanjin.

El dron toma imágenes parcialmente superpuestas de la superficie del glaciar, y un programa determina la elevación de la superficie con una resolución de unos 10 centímetros. Repetimos las mediciones más o menos cada seis meses hasta 2019. Descubrimos que el glaciar ya apenas se desliza y que, cada año, su frente retrocede unos 40 metros y su espesor disminuye en torno a 80 centímetros. Dentro de poco, ya no podrá considerarse un glaciar y pasará a ser una masa de hielo inerte que se deshará lentamente como un montón de nieve sucia acumulada en un aparcamiento. En teoría, un glaciar cubierto de escombros debería derretirse mucho más despacio que un glaciar desguarnecido situado a la misma altitud, puesto que las rocas actúan como aislante. Sin embargo, identificamos focos de deshielo que amplificaban el proceso general. Con imágenes tradicionales de satélite nunca los hubiéramos hallado, porque su resolución es demasiado baja.

Si introducimos todas las piezas del rompecabezas en nuestros modelos, podemos calcular cuánta agua discurrirá por los ríos en el futuro. Pero falta una última pieza fundamental: la cantidad de agua que fluye en la actualidad. Por sí sola, la altura del agua no indica el volumen del flujo, y hay que recurrir a la «curva de gasto», una relación entre la altura del agua y el caudal del río que debe representar tanto los torrenciales flujos monzónicos como la exigua escorrentía invernal. Sin embargo, obtener esa curva de forma fiable también supone un reto. Para ello, instalamos en el fondo del río transductores de presión alojados en tuberías de acero, o montamos sensores de radar en unas estructuras metálicas que se elevan unos metros sobre la superficie del agua. También vertemos sal al río aguas arriba y estudiamos cómo varía la conductividad eléctrica en el punto de medición; la concentración de la sal disuelta puede ayudarnos a determinar el caudal. Aunque en esa zona las condiciones son menos inhóspitas que a 5300 metros, las inundaciones monzónicas se llevan los aparatos por delante. Pero, tras años de esfuerzo, hemos logrado caracterizar bastante bien el flujo de agua.

AVALANCHAS E INUNDACIONES

En los últimos años, hemos integrado los datos de distintas cuencas en un modelo que describe todos los procesos que afectan al flujo de agua en el Himalaya, y otros científicos hacen lo mismo en otras regiones montañosas del planeta. El cambio climático potencia algunos factores adversos. Uno de ellos es el calentamiento dependiente de la elevación: las montañas se calientan más rápido que las llanuras situadas a menor altitud debido a retroalimentaciones atmosféricas como la formación de nubes, el aumento de la humedad o la disminución del albedo a medida que retrocede el manto de nieve. Un calentamiento global de 1,5 grados Celsius se traduce en un incremento de 2,1 grados en el Himalaya.



Otro factor es la estacionalidad. Una atmósfera más caliente retiene más humedad, lo que conlleva más precipitaciones en las montañas. También aumenta la proporción de lluvia frente a la de nieve, y el agua cae sobre superficies rocosas que antes estaban cubiertas de hielo, por lo que desciende enseguida hasta los ríos. De acuerdo con un estudio publicado el pasado julio, la mayoría de los modelos prevén un clima más húmedo en el futuro, aunque las condiciones pueden variar mucho dentro de la región. En comparación con los glaciares estables, los glaciares en proceso de fusión proporcionarán más aguas fluviales a corto plazo, pero menos a la larga, ya que retroceden y pierden espesor. Pensamos que Langtang alcanzará un pico de abastecimiento de agua hacia 2060, y luego el suministro disminuirá de forma constante.

Nuestra comprensión mejorará a medida que instalemos más sensores (de modo que la red de observación se haga más densa, sobre todo a gran altitud) e integremos los datos en modelos muy detallados. La teledetección por satélite también puede ayudarnos a caracterizar mejor los regímenes de precipitaciones entre los sensores de la cuenca, lo que permitiría refinar nuestros modelos. Otros grupos realizan avances similares en otras regiones montañosas; por ejemplo, existen abundantes datos de los Alpes y los Andes. La cobertura en el Himalaya está mejorando conforme los investigadores de las universidades de Katmandú y Tribhuvan dirigen su atención a regiones más elevadas y realizan mediciones en los macizos del Annapurna y el Everest.

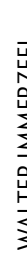
Mi equipo también ha analizado el suministro mundial mediante simulaciones hidrológicas. Nuestro artículo de *Nature* clasifica las torres de agua de todo el planeta, y las considera «importantes» si abundan los glaciares, la nieve o los lagos y si la demanda de agua por parte de la población que vive más abajo es grande. Entre las principales torres de agua figuran las asociadas al río Colorado en EE.UU., el río Fraser en Canadá y el río Negro en Argentina, así como las secciones de los Alpes que alimentan a los ríos Rin y Po.

Nuestro modelo muestra que las cordilleras de Asia, que sustentan grandes ríos como el Amu Daria y el Indo, son las torres más importantes del planeta. Sin embargo, también están entre las más vulnerables: los modelos predicen elevadas tasas de calentamiento en la región, así como un rápido crecimiento demográfico y económico que disparará la demanda de agua. Es probable que la disponibilidad media de agua no disminuya

USMAR HELLEMAN



EL CAMPAMENTO BASE DEL GLACIAR YALA, a 5300 metros de altitud, es el punto de partida de expediciones semestrales para instalar equipos y recuperar los datos de los instrumentos repartidos por las montañas. Los investigadores, incluido el autor (*con abrigo azul sobre la estructura metálica*), también reparan los sensores dañados por las temperaturas extremas y los vientos.


WALTER IMMERZEEL

hasta mediados de siglo, en parte debido a un aumento de las lluvias monzónicas, pero el pronóstico a largo plazo es desalentador. Predecimos que a finales de siglo se habrá perdido entre un 50 y un 60 por ciento del volumen de hielo, a menos que el mundo reduzca de manera drástica las emisiones de gases de efecto invernadero.

A corto plazo, el gran desafío para las regiones asiáticas de alta montaña será lidiar con los cambios temporales en el caudal de los ríos y con los riesgos naturales. En algunas cuencas, puede que el deshielo se adelante varias semanas, lo que obligará a los agricultores a cambiar las fechas de siembra y cosecha. La capacidad amortiguadora del manto de nieve será menor, y eso hará que se produzcan más crecidas en una región que ya sufre grandes inundaciones cada año.

Las lluvias extremas en las regiones montañosas también están provocando más deslizamientos de tierra, sobre todo durante los monzones. El mayor deshielo colma los lagos glaciares, lo que causa inundaciones devastadoras cuando las crestas rocosas que los represan se rompen debido a la enorme presión del agua. En las últimas dos décadas, los desastres naturales como las avalanchas, los deslizamientos de tierra y las inundaciones repentinas han dejado miles de víctimas y daños económicos por valor de miles de millones de dólares. El futuro incremento de las lluvias de carácter extremo y del calentamiento potenciará tales desastres. Los daños también aumentarán a medida que la creciente población construya ciudades y presas hidroeléctricas a altitudes cada vez mayores.

Aunque estas tendencias generales están claras, debemos estudiar en detalle cada región para ofrecer información útil a la población local. La región de Asia Central que conecta el este de las cordilleras del Pamir y del Karakórum con el oeste de las montañas de Kunlun constituye una excepción: los glaciares de esa zona son estables o incluso crecen, algo que no se observa en casi ningún otro lugar del planeta. Los datos recogidos durante el último año revelan que ese comportamiento anómalo podría estar relacionado con el incremento de la agricultura y la irrigación en la cercana cuenca del Tarim. En efecto, el agua de riego extraída del subsuelo y de fuentes superficiales se evapora y pasa a la atmósfera, y la transpiración de los cultivos añade aún más humedad. Ese vapor se condensa sobre las montañas y cae en forma de nieve, lo que nos recuerda que las acciones humanas pueden alterar los sistemas naturales.

POLÍTICAS DE MONTAÑA

Los estudios del ciclo hidrológico a gran altitud han empezado a concienciarnos sobre la importancia que reviste el agua de montaña para miles de millones de personas en todo el mundo. Los políticos deberían actuar ya para salvaguardarla.

El primer paso es incluir las montañas en los debates generales sobre la preservación de los recursos naturales de la Tierra. Los líderes locales pueden crear parques nacionales para proteger las áreas montañosas frente al desarrollo; establecer políticas que reduzcan las emisiones de contaminantes y carbono negro y, con ello, las partículas en suspensión; y construir depósitos para almacenar el agua de lluvia y del manto de nieve que se funde rápidamente en primavera, siempre y cuando analicen cómo podrían interferir con los ecosistemas el tamaño de esas estructuras y sus efectos en el flujo de agua. El valle de Langtang nos brinda un gran ejemplo. La aldea más alta no tuvo electricidad hasta hace dos años, cuando una organización no gubernamental y la comunidad construyeron una central hidroeléctrica que ahora suministra electricidad, y por lo tanto Internet, a los aldeanos.

Los países vecinos pueden cooperar para reducir la demanda de agua y firmar tratados que regulen las extracciones competitivas en los ríos procedentes de los picos más altos, que a menudo atraviesan fronteras nacionales [*véase* «La era de la hidrodiplomacia», por Jan Eliasson; Investigación y Ciencia, febrero de 2015]. Los ministros de ocho países de la región del Hindú Kush-Himalaya dieron ejemplo en octubre de 2020 al celebrar una cumbre sobre las montañas y firmar una declaración por la que se comprometían a usar la ciencia para mejorar las políticas de las zonas montañosas, a escuchar los consejos de la variopinta población de la región y a hablar con voz unánime en las negociaciones internacionales. Millones de personas de Afganistán, Bangladés, Bután, China, India, Birmania, Nepal y Pakistán dependen de las montañas del Hindú Kush-Himalaya para abastecerse de agua, y los regímenes pluviales y el rendimiento de los cultivos ya han empezado a cambiar.

Los picos más altos del mundo se están transformando muy deprisa. En los próximos decenios, muchas personas que viven aguas abajo deberán adaptarse a condiciones meteorológicas más extremas, mayores riesgos naturales y variaciones en el suministro de agua. Científicos, ingenieros y políticos deberían aunar esfuerzos y actuar ahora para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos de las montañas de cara a las generaciones futuras. IyC

PARA SABER MÁS

Climate change will affect the Asian water towers. Walter W. Immerzeel, Ludovicus P. H. van Beek y Marc F. P. Bierkens en *Science*, vol. 328, págs. 1382-1385, junio de 2010.
Importance and vulnerability of the world's water towers. Walter W. Immerzeel et al. en *Nature*, vol. 577, págs. 364–369, enero de 2020.
Energy and mass balance dynamics of the seasonal snowpack at two high-altitude sites in the Himalaya. Emmy E. Stigter et al. en *Cold Regions Science and Technology*, vol. 183, art. 103233, marzo de 2021.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agua. Robert P. Ambroggi en *IyC*, noviembre de 1980.
Los recursos hídricos, amenazados. J. W. Maurits la Rivière en *IyC*, noviembre de 1989.
Diez cuestiones clave sobre el hielo y la nieve. Thorsten Bartels-Rausch en *IyC*, septiembre de 2013.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad de París-Sorbona.

El misterio de Racetrack Playa

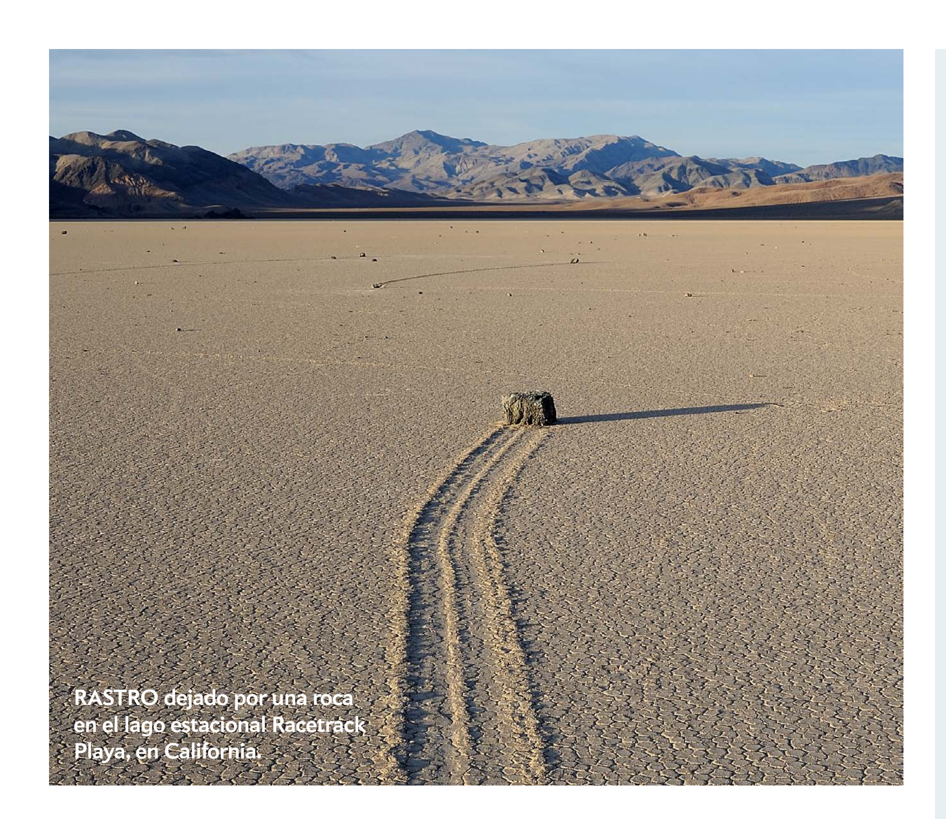
Las rocas de este lago estadounidense parecen desplazarse solas en trayectorias paralelas y sorprendentemente rectilíneas. ¿A qué se debe?

Racetrack Playa, un lago estacional situado en el Parque Nacional del Valle de la Muerte, en California, alberga un fenómeno desconcertante. Cada cierto tiempo, cientos de rocas se desplazan y dejan en el suelo surcos rectilíneos, de decenas de metros de largo y cuyo paralelismo y cambios bruscos de sentido sugieren que se mueven al unísono. Tales desplazamientos solo se producen en muy contados episodios, separados en ocasiones por varios años. El enigma no pudo resolverse hasta hace relativamente poco, cuando los investigadores instalaron en las piedras sensores de geolocalización y colocaron cámaras alrededor del lago.

El lugar, de difícil acceso y uno de los pocos del mundo donde se da este fenómeno, es especial en varios sentidos. Racetrack Playa es un lago de varios kilómetros cuadrados que tan solo se alimenta de las lluvias, por lo que cuando estas cesan se vacía a medida que el agua se evapora o se infiltra en el terreno. La

LAS ROCAS del lago estacional Racetrack Playa, en EE.UU., sufren cada cierto tiempo desplazamientos rectilíneos. Para hallar la causa, los investigadores se vieron obligados a equipar algunas piedras con sensores de geolocalización y otros instrumentos.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO


RASTRO dejado por una roca en el lago estacional Racetrack Playa, en California.

GETTY IMAGES/GNAGEL/ISTOCK

consecuencia es una falta de corrientes y, con ello, un lecho particularmente plano y horizontal, constituido por arena fina, cieno y arcilla.

Cuando el lago está seco, en él pueden verse gran cantidad de guijarros y rocas de hasta medio metro de ancho. Y muchas de ellas se encuentran situadas al final de surcos trazados en el suelo, como si se hubieran movido solas. ¿Cómo es posible?

¿Una planicie barrida por el viento?

La presencia de un fondo limoso, especialmente resbaladizo cuando está húmedo, invita a pensar que las rocas más planas podrían deslizarse con facilidad sobre él. Algunos datos así lo sugieren. El coeficiente de rozamiento estático sobre el suelo húmedo toma un valor cercano a 0,15, mientras que para los materiales más usuales (madera, metal, etcétera) suele ascender a 0,5 o 0,6. Eso significa que, para desplazar las piedras sobre la superficie, basta con aplicar una fuerza igual a 0,15 veces su peso. Pero ¿de dónde procede dicha fuerza?

El suelo de Racetrack Playa no muestra el menor signo del paso de animales. ¿Podría tratarse del viento? Al respecto, hagamos una primera estimación. Una piedra cúbica de 15 centímetros de arista presenta una masa aproximada de unos 9 kilogramos. Por tanto, requerirá un empuje horizontal de unos 13 newtons para moverse. Eso correspondería a vientos horizontales de entre 30 y 35 metros por segundo, una velocidad mayor que las de los vientos que baten la zona.

De hecho, varios estudios han confirmado que, por sí solo, el viento no basta para mover las piedras del lago. Así pues, ¿qué otra causa podría ser la responsable?

¿Balsas de hielo?

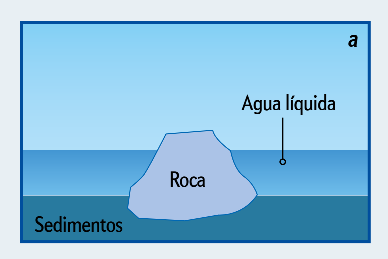
El movimiento de rocas se produce en invierno, cuando el lago puede helarse. A partir de aquí, el geólogo Gunther Kletetscka, de la Universidad Carolina de Praga, y sus colaboradores propusieron en 2013 una hipótesis para explicar el fenómeno. Esta se basa en que la conductividad térmica de la piedra es cuatro veces mayor que la del agua.

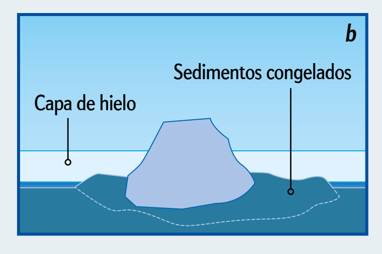
Imaginemos que, en el momento en que comienza a helar, el nivel del agua sea tal que aún emerge de ella una porción considerable de la roca. En tal caso, y dado que el calor se difunde particularmente bien a través de ella, la piedra alcanzará con rapidez una temperatura inferior a los cero grados centígrados. El agua que esté en contacto con ella se congelará y formará un caparazón de hielo en torno a la porción sumergida. Además, ese hielo podrá extenderse por debajo del peñasco, ya que los sedimentos y el cieno estarán también muy húmedos.

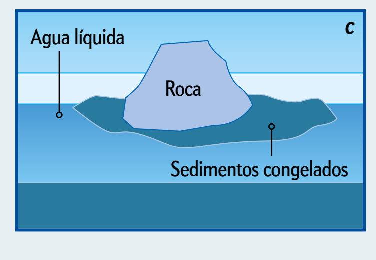
Dado que el nivel del lago siempre podrá aumentar con la llegada de nueva agua desde las zonas circundantes, el conjunto formado por la roca y la «balsa» de hielo podrá desprenderse del fondo y comenzar a flotar (*véase el recuadro* «Una hipótesis errónea»). Con nuestro cubo de 15 centímetros, y olvidando por un momento la fragilidad mecánica del hielo, haría falta una balsa de 4 centímetros de grosor sobre una base algo menor de 1500 metros cuadrados para hacerlo flotar debido al empuje de Arquímedes.

UNA HIPÓTESIS ERRÓNEA

EN 2013, un equipo de la Universidad Carolina de Praga propuso una hipótesis que, sin embargo, acabaría demostrándose equivocada. Según ella, una roca parcialmente sumergida durante el comienzo de una helada (*a*) causaría la congelación de los sedimentos situados inmediatamente debajo (*b*). Si se produce un aporte adicional de agua líquida, esa «balsa» de hielo se desprendería y el conjunto formado por la roca y los sedimentos congelados comenzaría a flotar, tras lo cual se vería arrastrado por el viento (*c*). No obstante, varias observaciones posteriores revelaron que las balsas de hielo formadas de esta manera eran demasiado delgadas para asegurar la flotación.







Se trata de una cantidad considerable. Pero, incluso con una balsa más pequeña, nuestra roca podría verse lo bastante aligerada para ser impulsada por el viento. Los rastros paralelos y uniformes que dejan las piedras próximas entre sí parecen apoyar esta hipótesis: todas esas piedras habrían quedado atrapadas en la misma balsa de hielo, y no se desplazarían rodando, sino que se arrastrarían sobre el fondo.

Sin embargo, varias observaciones acabaron invalidando esa seductora explicación. En primer lugar, las trayectorias que dejan las piedras cercanas no son perfectamente paralelas, sino que se acercan y se alejan levemente. Por tanto, cabe concluir que tales rocas no pueden moverse solidariamente sobre un mismo bloque de hielo.

Pero, además, hay otros indicios que permiten descartar la hipótesis. Por un lado, el espesor de hielo necesario para asegurar la flotación parece ser mucho mayor que el que suele darse en el lago. Por otro, cuando la temperatura es inferior a los cero grados Celsius y el lago se congela por completo, las rocas no pueden desplazarse; el hielo tiene que quebrarse primero para que las placas comiencen a ir a la deriva. Sin embargo, tan pronto como suban las temperaturas, las piedras se calentarán mucho más rápido que el agua, por lo que será a su alrededor donde el hielo se funda con mayor rapidez. Como consecuencia, las rocas se desprenderán de su balsa antes de que esta haya tenido tiempo de moverse. Por último, los surcos observados en el suelo son demasiado profundos para deberse a un conjunto piedra-hielo aligerado.

Una nueva hipótesis

La razón principal por la que el enigma de Racetrack Playa persistió durante tanto tiempo fue la dificultad que entrañaban las observaciones. Incluso imaginando el mejor momento para estudiar el fenómeno, resulta difícil distinguir a simple vista el lento movimiento de las piedras —estimado entre 1 y 2 metros por minuto— en un paisaje carente de puntos de referencia. Por ello, fue necesario instalar balizas de geolocalización, cámaras y sensores de temperatura. Fue así como Richard Norris, investigador del Instituto Scripps de Oceanografía, y sus colaboradores lograron explicar el fenómeno.

Para ello, los investigadores comenzaron registrando cada hora la posición y la temperatura de las rocas hasta que, gracias a un disparador magnético enterrado en el suelo, se detectaban indicios de movimiento. En ese momento, la toma de datos se hacía continua y varias cámaras situadas en distintos puntos comenzaban a grabar.

El método reveló que los movimientos se producían en días claros y soleados, y después de noches con temperaturas inferiores a los cero grados centígrados. Hacia el mediodía, el calor y el viento habían roto la delgada capa de hielo formada durante la noche. Y eran esas las placas de hielo que, movidas por el viento, empujaban las piedras.

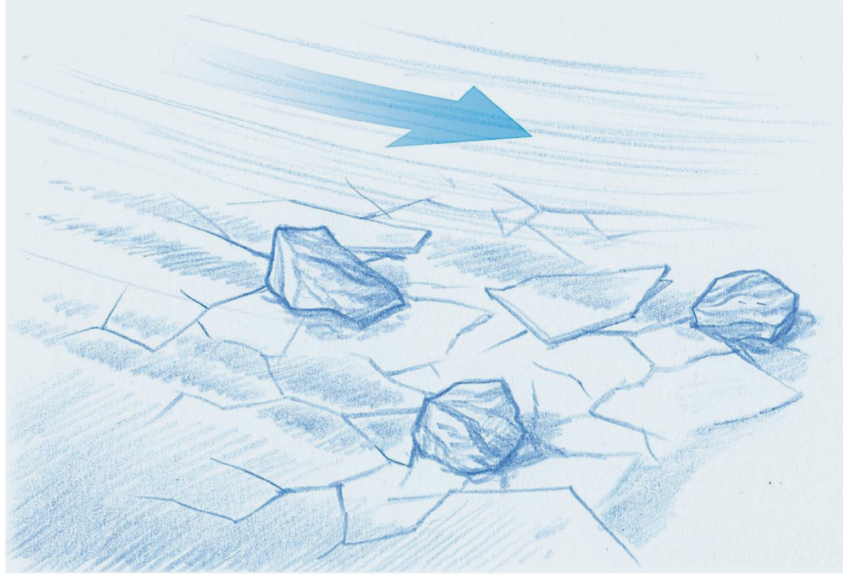
Las placas, de entre 3 y 6 milímetros de espesor, son demasiado finas para levantar los peñascos. Sin embargo, la gran superficie que ofrecen al viento las somete a fuerzas laterales que hacen que se solapen. Eso conduce a que presenten al viento un frente aún mayor, hasta el punto de que entonces ya pueden arrastrar las piedras que se hallan en su camino (*véase el recuadro* «La solución al enigma»).

Esta explicación da también cuenta de por qué los movimientos de las rocas parecen sincronizados, ya que se trata de piedras que han sido empujadas por un mismo conjunto de placas de hielo. Y los surcos no son perfectamente paralelos porque cada canto es empujado con independencia de los demás. En algunos casos, hasta 60 piedras se han visto arrastradas en la misma dirección. Estos movimientos son raros y breves: las grabaciones revelan una duración de unos veinte minutos como mucho.

A la influencia del viento sobre las placas se suma el movimiento del agua causado por el viento. Con una velocidad comprendida entre 60 y 100 centímetros por minuto, tales desplazamientos transportan agua desde la parte norte del lago hasta su parte meridional. Ello facilita el movimiento de las placas y, por tanto, el desplazamiento de las piedras.

LA SOLUCIÓN AL ENIGMA

TRAS UNA SERIE DE OBSERVACIONES obtenidas gracias a sensores colocados en las piedras, el equipo de Richard Norris, del Instituto Scripps de Oceanografía, halló en 2014 la causa de su desplazamiento. Según los investigadores, las rocas avanzan impulsadas por las placas de hielo que se forman durante una noche fría. Al llegar el día, esas placas se rompen y, gracias a su gran superficie, son empujadas por el viento. El movimiento de las rocas se ve además facilitado por las corrientes de agua líquida creadas por el viento.



PARA SABER MÁS

Sliding stones of Racetrack Playa, Death Valley, USA: The roles of rock thermal conductivity and fluctuating water levels. Gunther Kletetschka et al. en *Geomorphology*, vol. 195, págs. 110-117, agosto de 2013.

Sliding rocks on Racetrack Playa, Death Valley National Park: First observation of rocks in motion. Richard D. Norris et al. en *PLoS One*, vol. 9, art. n.º e105948, agosto de 2014.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La hipótesis de Riemann (y IV)

La música de los números primos

Un año, Hardy pasó sus vacaciones con Bohr en Dinamarca. Acabado el verano, debía regresar a Inglaterra para comenzar el curso, pero solo había disponible un pequeño barco (no había tráfico aéreo en aquel tiempo). Como es sabido, a veces el mar del Norte puede estar bastante revuelto, y la probabilidad de que un pequeño barco como aquel se hundiera no era exactamente cero. Como no tenía otra opción, Hardy embarcó, pero se le ocurrió enviar una postal a Bohr con el siguiente texto: «He demostrado la hipótesis de Riemann —G. H. Hardy». Si el barco se hundía y se ahogaba, razonó, todo el mundo creería que había demostrado la hipótesis de Riemann. Pero Dios no consentiría que él tuviera ese gran honor, y por eso no dejaría que el barco se hundiera. Obviamente, puesto que Hardy llegó a salvo a Inglaterra, este curioso seguro de vida fue eficaz.

—George Pólya (1887–1985)

En el año 1900, el alemán David Hilbert, uno de los mayores matemáticos de todos los tiempos, pronunció una conferencia durante la celebración del Segundo Congreso Internacional de Matemáticos en París. En ella Hilbert enunció los que, desde su punto de vista, debían ser considerados los 23 problemas no resueltos más importantes de las matemáticas, aquellos en los que la comunidad debería volcar todos sus esfuerzos.

En conmemoración del centenario de la conferencia de Hilbert, el 24 de mayo del año 2000, el Instituto Clay de Matemáticas anunció en un congreso en París que premiaría con un millón de dólares a quien lograra demostrar cualquiera de los siete problemas matemáticos que desde entonces se conocen como los Problemas del Milenio. De la selección original de Hilbert, solo uno aparecía en la nueva lista: la hipótesis de Riemann. Hoy, esta conjetura, que en ocasiones ha sido calificada como el problema abierto más importante de toda la matemática, sigue sin resolver.

Una de las razones por las que la conjetura de Riemann es importante es porque se encuentra relacionada con la distribución de los números primeros. A lo largo de esta serie hemos visto que, por un lado, los números primos parecen surgir en la sucesión de los naturales de manera caótica, sin seguir ningún patrón obvio. Sin embrago, para números muy grandes, la «función contador» de los números primos (la que nos dice cuántos primos hay por debajo de un número x dado), $\pi(x)$, se comporta de una forma sorprendentemente regular:

$$\pi(x) \approx \int_2^x \frac{dt}{\log t} \equiv \mathrm{Li}(x) \ ,$$

donde esta función se conoce como «logaritmo integral».

La función contador es una función escalonada que sube un peldaño cada vez que en la sucesión de los naturales aparece un número primo. Por tanto, «sabe» dónde están. Encontrar el secreto de su distribución puede traducirse entonces en la siguiente pregunta: ¿es posible hallar una fórmula para $\pi(x)$?

La función zeta de Riemann

La teoría analítica de números despegó con la expresión encontrada por Leonhard Euler de la función zeta (ζ) como productorio de primos:

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \prod_{p \text{ primo}} \left(1 - \frac{1}{p^s}\right)^{-1} \ .$$

Euler había considerado valores reales de la variable s, en cuyo caso la función zeta solo converge cuando $s > 1$. Como comentábamos en nuestra última columna, esta identidad sugiere que la función zeta «conoce» los números primos. ¿Es posible ir más allá?

Esta pregunta fue la que se hizo Georg Friedrich Bernhard Riemann en 1859, en un artículo titulado «Sobre el número de primos por debajo de una cierta cantidad». En él, Riemann partió de la función zeta de Euler, pero extendió su dominio de definición. En lugar de considerarla una función de variable real, analizó qué ocurriría si el argumento podía tomar también valores complejos; es decir, si $s = \sigma + it$.

A partir de su expresión como una serie infinita, la función zeta solo está bien definida para números complejos con parte real $\sigma > 1$. Sin embargo, Riemann encontró una manera de extender la función al resto del plano complejo [*véase* «¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales?», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, octubre de 2020]. Esta función es la que hoy conocemos como función zeta de Riemann.

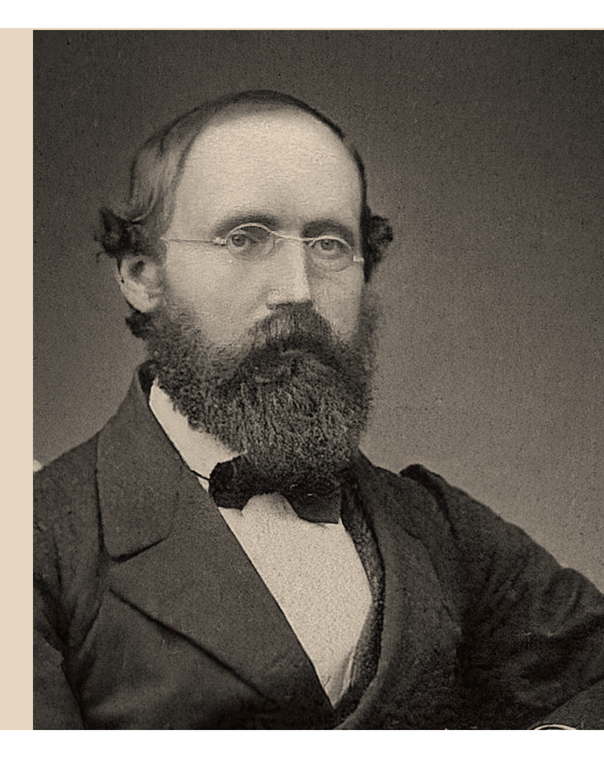
El único punto del plano complejo en el que la función zeta se hace infinita es $s = 1$. El tipo de comportamiento que presenta en este punto se conoce en matemáticas como «polo simple». Esto quiere decir que, aunque $\zeta(s)$ diverge en $s = 1$, la función $(1 - s)\zeta(s)$ no lo hace: es una función suave y que toma valores finitos en todo el plano complejo.

Dado que tales funciones pueden expresarse como series de potencias, o polinomios infinitos, sus «ceros» (aquellos puntos donde la función se anula) la definen totalmente. Así pues, ¿dónde están los ceros de la función $\zeta(s)$?

Riemann halló que la función $\zeta(s)$ tenía dos conjuntos de ceros: todos los números impares negativos (−2, −4, −6...), conocidos desde entonces como «ceros triviales», y otros de distribución mucho más oscura a los que llamaremos ρ. En su



EN EL SIGLO XVIII, Leonhard Euler (*izquierda*) definió la función zeta como la suma infinita $\zeta(s) = 1/1^s + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s...$, donde la variable *s* tomaba valores reales. En 1859, Bernhard Riemann (*derecha*) logró extender el dominio de definición de $\zeta(s)$ a todo el plano complejo y halló una fórmula que relacionaba dicha función con la distribución de los números primos. El resultado conectó dos grandes áreas de las matemáticas —el análisis de funciones complejas y la teoría de números— y dio lugar a un ambicioso programa de investigación que continúa hoy.





artículo, Riemann logró factorizar la función zeta a partir de sus ceros de la siguiente manera:

$$(1-s)\zeta(s) =$$
$$\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{e}\right)\prod_{n=1}^{\infty}\left(1+\frac{s}{2n}\right)e^{-\frac{s}{2n}}\prod_{\rho}\left(1-\frac{s}{\rho}\right)e^{\frac{s}{\rho}},$$

donde el primer productorio corresponde a la contribución de los ceros triviales, y el segundo, a todos los demás.

Comparando «el productorio de ceros» con «el productorio de primos» de Euler, Riemann descubrió una fórmula explícita para la función contador. Dicha expresión es la que desde entonces trae de cabeza a los matemáticos.

Una fórmula para $\pi(x)$

A continuación esbozaremos brevemente las pasos que dio Riemann para encontrar una fórmula para $\pi(x)$. Quienes no estén interesados en los detalles técnicos no tienen de qué preocuparse: pueden saltar al último párrafo de esta sección y seguir leyendo a partir de ahí.

Para relacionar $\zeta(s)$ con $\pi(x)$, Riemann comenzó considerando la siguiente versión de la función contador:

$$\Pi(x) = \sum_{p^m \leq x} \frac{1}{m} \,.$$

Mientras que $\pi(x)$ es una función escalonada que suma uno cada vez que aparece un número primo, $\Pi(x)$ es una función escalonada que añade $1/m$ cada vez que encuentra un número natural que es la m-ésima potencia de un primo: p^m.

Calculemos, por ejemplo, $\Pi(10)$. Los números p^m menores o iguales que 10 son 2, 2^2, 2^3, 3, 3^2, 5 y 7. Por tanto:

$$\Pi(10) = \sum_{p^m \leq 10} \frac{1}{m} = \underbrace{\left(\frac{1}{1}+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}\right)}_{\text{potencias de 2}}$$
$$+\underbrace{\left(\frac{1}{1}+\frac{1}{2}\right)}_{\text{de 3}}+\underbrace{\left(\frac{1}{1}\right)}_{\text{de 5}}+\underbrace{\left(\frac{1}{1}\right)}_{\text{de 7}} .$$

Notemos que aparecen 4 sumandos de valor 1/1, uno por cada número primo menor o igual que 10. Hay 2 sumandos de valor 1/2, puesto que solo hay dos cuadrados de primos menores o iguales que 10. Por último, el sumando 1/3 solo aparece una vez, ya que solo hay un cubo de primos menor o igual que 10. De modo que podemos reescribir $\Pi(10)$ como

$$\Pi(10) = 4\left(\frac{1}{1}\right)+2\left(\frac{1}{2}\right)+1\left(\frac{1}{3}\right) .$$

Observemos que los factores 4, 2 y 1 se corresponden con $\pi(10)$, $\pi(10^{1/2})$ y $\pi(10^{1/3})$. En general, puede demostrarse que

$$\Pi(x) = \sum_{p^m \leq x} \frac{1}{m} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\pi(x^{1/m})}{m} \;,$$

donde, aunque el sumatorio sea infinito, en realidad solo recorre un número finito de términos: para un x dado, la serie se corta a partir de un cierto valor m tal que $x^{1/m} < 2$ (el número primo más pequeño de todos). En nuestro ejemplo, $\pi(x^{1/m})$ vale 0 para $m > 3$, ya que $10^{1/4} < 2$.

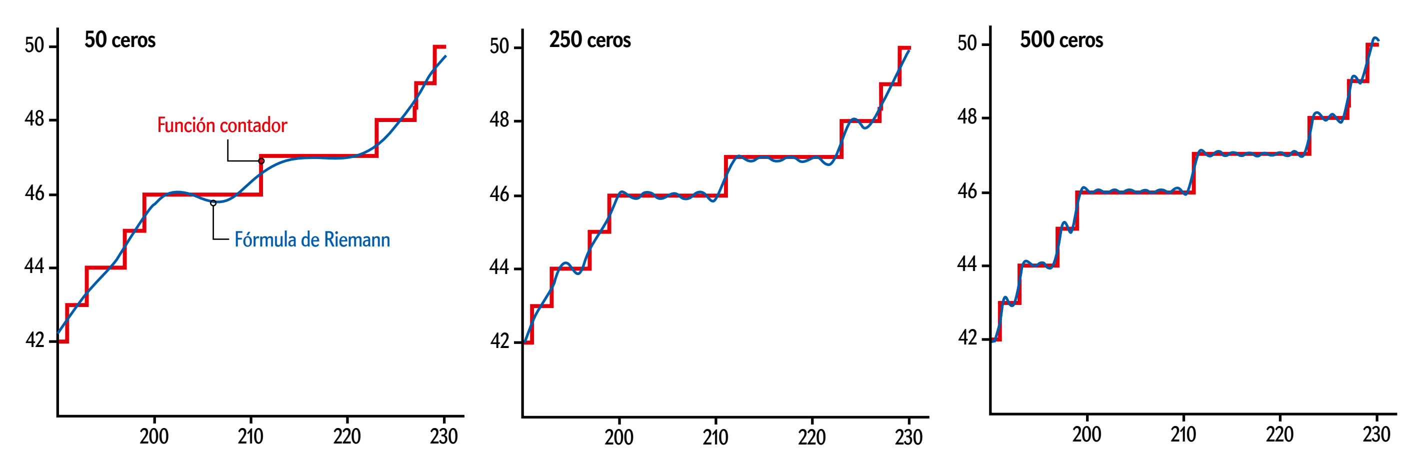
Por tanto, la función contador de Riemann, $\Pi(x)$, es una versión «ponderada» de la función contador habitual. A partir de aquí, Riemann pudo despejar la función contador de los números primos de la siguiente manera:

$$\pi(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu(m)}{m}\,\Pi(x^{1/m}) \,,$$

donde $\mu(m)$, conocida como «función aritmética de Möbius», es una función que solo toma los valores −1, 0 o 1 dependiendo de la factorización de m. Vale 0 cuando el número natural m presenta una factorización con alguna potencia de un número primo (como $\mu(24) = \mu(2^3{\times}3) = 0$). En caso contrario, si todos los primos en la factorización aparecen solo una vez, y si k es su cantidad, $\mu(m) = (-1)^k$ (por ejemplo, $\mu(10) = \mu(2 \times 5) = (-1)^2 = 1$; en particular, si p es primo, $\mu(p) = -1$).

Riemann demostró que $\Pi(x)$ podía escribirse a partir de ρ, los ceros no triviales de la función zeta, de la siguiente manera:

$$\Pi(x) = \mathrm{Li}(x) - \sum_{\rho}\mathrm{Li}(x^{\rho}) - \log 2$$
$$+\int_{x}^{\infty}\frac{dt}{t(t^2-1)\log t} \,.$$



LA FUNCIÓN CONTADOR DE LOS NÚMEROS PRIMOS (*rojo*) y el desarrollo «en armónicos» encontrado por Riemann para dicha función (*azul*), representado aquí para los primeros 50, 250 y 500 ceros no triviales de la función zeta. A medida que añadimos más ceros en la expresión, esta converge a la función contador.

Por último, introdujo este valor en la ecuación anterior de $\pi(x)$ para encontrar una fórmula explícita en función de dichos ceros:

$$\pi(x) = R(x) - \sum_{\rho} R(x^{\rho}) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu(m)}{m} \int_{x^{1/m}}^{\infty} \frac{dt}{t(t^2-1)\log t} ,$$

donde $R(x)$, o «función de Riemann», se define como

$$R(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu(n)}{n} \operatorname{Li}(x^{1/n}) .$$

Detalles aparte, la importancia de este resultado es imposible de sobreestimar: la función contador de los números primos, el ente matemático que codifica los secretos de su distribución, puede expresarse en función de ρ, los ceros no triviales de la función zeta. Si conocemos dónde están dichos ceros, sabremos todo lo que se puede saber sobre los números primos.

Los ceros de la función zeta y los números primos

¿Qué conclusiones podemos extraer de la expresión de Riemann para $\pi(x)$? Observemos que el término integral decrece a medida que x aumenta, de modo que, para números muy grandes, podemos despreciarlo. $R(x)$ es una serie cuyo término dominante es el primero, dado por $\operatorname{Li}(x)$, la función logaritmo integral. Este término crece con x, por lo que, tal y como afirma el teorema de los números primos, constituye una excelente aproximación asintótica.

Así pues, si interpretamos $R(x)$ como el «valor medio» de $\pi(x)$, el sumatorio que depende de ρ actuaría como las fluctuaciones alrededor de esa media. De modo que los ceros no triviales de la función zeta de Riemann controlan las oscilaciones de los números primos alrededor de sus «posiciones esperadas».

Una manera de ordenar los ceros de la función zeta es en función de su distancia al eje real; es decir, en función del valor absoluto de su parte imaginaria. Si ahora usamos la expresión de Riemann para calcular $\pi(x)$ incluyendo cada vez más y más ceros (ordenados tal y como acabamos de describir), veremos el sorprendente comportamiento que muestra la figura superior: ¡cuantos más ceros no triviales añadimos, más se aproxima el resultado a la función contador de los números primos!

La hipótesis de Riemann

Ahora bien, ¿cómo se distribuyen los ceros no triviales de la función zeta en el plano complejo? Es posible demostrar que todos ellos se encuentran en la llamada «banda crítica»: la franja vertical de números complejos con parte real mayor que 0 y menor que 1. Además, Riemann hizo notar que todos ellos son simétricos con respecto a la línea $\sigma = 1/2$, así como con respecto al eje real ($t = 0$)

Riemann halló a mano los primeros ceros no triviales y observó algo curioso: que todos ellos tenían parte real igual a 1/2 (*véase la figura de la página siguiente*). Esta recta del plano complejo se conoce desde entonces como «línea crítica». En su artículo de 1859 escribió que «era muy probable» que todos los ceros se hallasen en la línea crítica y añadió:

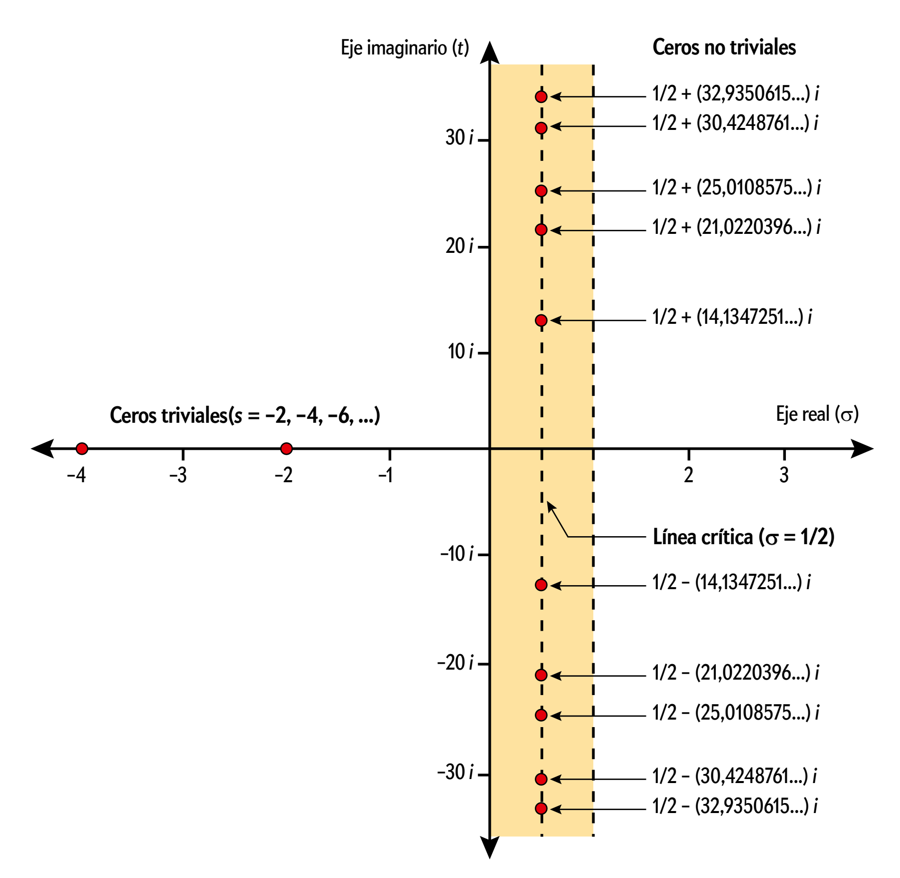
Por supuesto, sería deseable contar con una demostración rigurosa. Por ahora, y tras algunos intentos fugaces y vanos, he decidido dejarla de lado, ya que parece prescindible para el siguiente objetivo de mi investigación.

Esta conjetura, que todos los ceros no triviales de la función zeta se hallan sobre la línea crítica $\sigma = 1/2$, es la célebre hipótesis de Riemann. ¿Por qué es tan importante?

La fórmula de Riemann seguiría siendo válida aunque no todos los ceros de la función zeta estuvieran sobre la línea crítica. Pero, si la hipótesis de Riemann es cierta, la posición de un cero en la línea crítica (cuán alejado está del eje real) nos indica la magnitud de su contribución al valor de $\pi(x)$. En analogía con un desarrollo de Fourier, los ceros no triviales actúan como los sucesivos «armónicos» de la música de los primos.

Este es el comportamiento que vemos en las gráficas superiores: cuantos más «armónicos» añadimos, más fiel es la aproximación. En cambio, si la función zeta tiene ceros fuera de la línea crítica, la expresión de Riemann para $\pi(x)$ podría exhibir grandes fluctuaciones en algún momento, lo que arruinaría ese buen comportamiento.

En la fórmula de Riemann para $\pi(x)$ aparece la función $\operatorname{Li}(x)$. Jacques Hadamard y Charles Jean de la Vallée Poussin demostraron el teorema de los números primos justamente probando que ese término era el dominante si la función zeta no poseía ceros en la línea vertical $\sigma = 1$. En particular, Poussin fue capaz de acotar el error que se comete al tomar $\operatorname{Li}(x)$ como aproximación gracias a que todos los ceros no triviales están en la banda crítica y son simétricos respecto a la línea crítica.



¿CÓMO SE DISTRIBUYEN LOS CEROS de la función zeta (*rojo*) en el plano complejo? Es posible demostrar que todos los ceros no triviales se encuentran en el interior de la «banda crítica» (*amarillo*), que son simétricos con respecto al eje real y con respecto a la línea crítica σ = 1/2. En 1859, Riemann conjeturó que todos debían hallarse sobre dicha línea. Hoy se conocen decenas de billones y todos ellos satisfacen dicha condición. Sin embargo, nadie ha sido capaz de encontrar una demostración rigurosa.

En 1901, Helge von Koch demostró que la veracidad de la hipótesis de Riemann era equivalente a la estimación más precisa posible de este error:

$$|\pi(x) - \mathrm{Li}(x)| < A x^{1/2} \log x \,,$$

donde A es una constante numérica.

En definitiva, la veracidad de la hipótesis de Riemann equivale a afirmar que los números primos se comportan «de la mejor manera posible».

A la espera de una demostración

Hoy existen métodos numéricos muy potentes que permiten encontrar todos los ceros de la función zeta en la banda crítica hasta cierta altura. Hasta ahora se han calculado los primeros 10^{13} ceros y todos ellos se encuentran exactamente en la línea crítica. Sin embargo, esto no cuenta como una demostración en matemáticas. Menos aún en teoría de números, donde sabemos que hay comportamientos que se mantienen hasta cifras muchísimo mayores solo para quebrarse después [*véase* «La hipótesis de Riemann (II)», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, enero de 2021].

Puede resultar contraintuitivo, pero algunos matemáticos piensan que la solución a la hipótesis de Riemann acabará llegando como un caso particular de una generalización demostrable. Por ejemplo, la hipótesis de Riemann puede generalizarse a partir de las llamadas «funciones L» de Dirichlet, definidas como

$$L(s,\chi) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\chi(n)}{n^s} \,,$$

donde $\chi(n)$ es un «carácter», como el que vimos en nuestra última columna. Todas las funciones L cumplen una identidad semejante a la de Euler y pueden prolongarse analíticamente. La hipótesis de Riemann generalizada, enunciada por G. H. Hardy y John Edensor Littlewood, afirma que los ceros no triviales de estas prolongaciones analíticas están situados en la misma línea crítica: σ = 1/2.

Puede también que la solución venga de la física. A principios del siglo xx, Hilbert y el matemático húngaro George Pólya propusieron, de manera independiente, un nuevo enfoque: encontrar un operador (una matriz infinita) cuyos autovalores fueran los ceros de la función zeta de Riemann. En 1972, el famoso encuentro casual entre el matemático Hugh Montgomery y el físico Freeman Dyson puso en evidencia que las correlaciones entre pares de ceros de la función zeta de Riemann obedecían la misma ley que la función de correlación entre pares de autovalores de una matriz hermítica aleatoria, usada para modelizar los niveles de energía de los núcleos atómicos pesados [*véase* «El espectro del riemannio», por Brian Hayes; Investigación y Ciencia, enero de 2004]. Una conexión de tintes místicos que hubiera hecho enormemente feliz a Pitágoras, para quien «todo era número».

En 1914, Hardy demostró que existían infinitos ceros sobre la línea crítica. Pero eso no era suficiente: Riemann conjeturó que en ella estaban *todos* los ceros no triviales. En 1962, Littlewood dijo que estaba seguro de que la hipótesis de Riemann era falsa, porque no había ninguna razón imaginable para que fuera cierta. Sin embargo, la mayor parte de los matemáticos, guiados por la belleza, la elegancia, y la enorme cantidad de teoremas demostrados suponiendo su veracidad, creen que es verdadera.

Quizá la hipótesis de Riemann sea una proposición indecidible: una cuya certeza ni cuya falsedad se pueden demostrar. En cierta ocasión, Hilbert comentó en una entrevista: «Lo primero que haría si volviese a la vida dentro de 500 años sería averiguar si alguien ha resuelto la hipótesis de Riemann». Ya han pasado cien de esos años y el problema sigue abierto.

PARA SABER MÁS

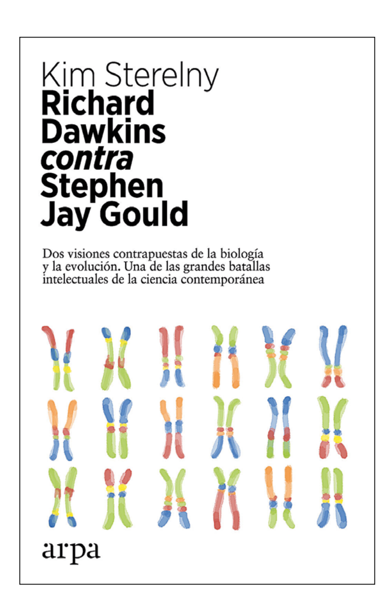
Riemann's zeta function. H. M. Edward. Dover, 2001.

La hipótesis de Riemann: El eslabón perdido entre los números primos y la mecánica cuántica. Jorge Jiménez Urroz. EMSE EDAPP, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

El espectro del riemannio. Brian Hayes en *IyC*, enero de 2004.

¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales? Bartolo Luque en *IyC*, octubre de 2020.



RICHARD DAWKINS CONTRA STEPHEN JAY GOULD

Kim Sterelny
Arpa, 2020
256 págs.

Duelo de titanes de la teoría evolutiva

Una brecha (¿insalvable?) en nuestra comprensión de la biología

La controversia y el debate son una parte consustancial del avance científico. Casi todas las revistas especializadas tienen una sección de comentarios a los artículos, donde autores que discrepan de las conclusiones de un trabajo pueden explicar sus argumentos en contra. Esos comentarios pasan un filtro de revisión por pares y, si se aceptan, aparecen publicados junto a la respuesta de los autores originales. En los congresos científicos, uno asiste con frecuencia a debates entre investigadores que sostienen posturas encontradas sobre temas en los que aún no se ha alcanzado el consenso. Pero, salvo casos famosos, como el de Oxford de 1860 entre Thomas Huxley y el obispo Wilberforce —que no fue estrictamente científico—, todo esto suele quedar «en casa». Es muy raro que las controversias salgan a la luz pública, tanto por la naturaleza técnica de los debates como por circunscribirse estos a los foros científicos.

El enfrentamiento entre los biólogos Richard Dawkins y Stephen Jay Gould constituye una excepción por dos motivos. Ambos investigadores son pesos pesados de la teoría evolutiva y magníficos divulgadores, muy prolíficos y de gran éxito editorial. En la sección de divulgación científica de cualquier librería se dedican estantes enteros a los ensayos de estos dos autores. ¿Significa eso que hemos de optar por una de dos versiones de la teoría evolutiva? En realidad no, pues ambos coinciden en lo esencial.

Tanto Dawkins como Gould convienen en que cualquier forma de vida actual ha evolucionado a partir de seres vivos muy primitivos, seguramente parecidos a las bacterias actuales, y en que estos a su vez provenían de alguna forma de organización de la materia inorgánica. Coinciden también en que eso ha ocurrido por causas puramente naturales, sin intervención divina de ninguna clase. Están también de acuerdo en que el mecanismo básico de la evolución es la selección natural, y que para que esta pueda funcionar es necesaria la intervención del azar. Por este motivo, no hay un propósito determinado en la evolución ni se puede hablar de «progreso evolutivo»: cualquier especie de las que existen hoy en día se encuentra tan bien adaptada al medio como cualquier otra (ya que, de lo contrario, se habría extinguido). Coinciden también en que la adaptación es acumulativa: la aparición de órganos complejos (como el ojo, un caso que ya discutió Darwin en *El origen de las especies*) es el resultado de una lenta agregación de pequeños cambios durante largos períodos de tiempo. No podría ser de otro modo, pues el perfecto ajuste de sus elementos hace que un gran cambio tenga con toda probabilidad consecuencias catastróficas. Hasta tal punto están de acuerdo estos dos autores que casi es indiferente recomendar uno u otro para aprender sobre evolución biológica.

> El filósofo Kim Sterelny se basa en el enfrentamiento entre estos dos científicos para analizar el estado de la cuestión en la teoría evolutiva

Y entonces, ¿en qué discrepan? Realmente en poco. Se trata más bien de una cuestión sobre la importancia relativa que uno y otro conceden a distintos aspectos de la evolución. Dawkins se centra sobre todo en lo que podríamos llamar «microevolución»; esto es, en los aspectos mecanicistas de los replicadores básicos, los genes, que hacen que algunos tengan éxito y otros no, y explica toda la evolución a partir de ellos. Como ya puso de manifiesto en *El gen egoísta* (1976), su *opera prima,* Dawkins piensa que cualquier patrón evolutivo es una consecuencia de la lucha de genes para perpetuar su linaje. Una lucha tan compleja que les lleva a establecer alianzas, inicialmente en forma de cromosomas, y en última instancia en forma de seres pluricelulares e incluso de comunidades enteras de ellos, como ocurre con las hormigas y demás insectos sociales.

Gould, en cambio, opina que la «macroevolución» muestra patrones que no pueden explicarse a partir de una simple extrapolación de tales procesos microscópicos, y da especial importancia al papel desempeñado por el azar. Gould era paleontólogo y, como tal, su visión de la evolución se hallaba muy influida por el registro fósil. La contingencia de la evolución fue uno de sus temas preferidos, el cual que desarrolló en una de sus mejores obras, *La vida maravillosa* (1989). En ella se centra en la explosión de vida multicelular que ocurrió en el Cámbrico, hace unos 540 millones de años, donde aparecieron los patrones corporales que hoy dominan el reino animal, así como otros que se han extinguido. Se cuestiona hasta qué punto la supervivencia de unos y no de otros no fue más que una cuestión de azar, el resultado de uno de los muchos cataclismos que han sacudido a la vida sobre la Tierra a lo largo de su historia evolutiva, y que han hecho que unas especies sobrevivan y otras no por causas que nada tienen que ver con su adaptación al medio, dado que este se ve

alterado de forma brusca. El impacto del meteorito que a finales del Cretácico hizo desaparecer a los dinosaurios constituye uno de los ejemplos más estudiados de este fenómeno.

La otra cuestión recurrente en Gould son las restricciones que la física impone a la evolución, y que hace que determinadas formas sean más viables que otras, y que algunas sendas evolutivas resulten simplemente imposibles de transitar. Según él, el hecho de que desde el Cámbrico no hayan aparecido más planes corporales se debe precisamente a que, una vez que la evolución ha optado por uno, ya no hay vuelta atrás, ya que eso requeriría cambios demasiado drásticos. A partir de ahí, cualquier adaptación futura debe respetar el plan corporal básico. La evolución construye sobre lo que hay, rara vez inventa *de novo*.

En *Richard Dawkins contra Stephen Jay Gould,* el filósofo Kim Sterelny se basa en el enfrentamiento entre estos dos científicos para analizar el estado de la cuestión en la teoría evolutiva. Gould falleció en 2002 víctima de un cáncer de pulmón diagnosticado en 1982, y Dawkins se halla hoy envuelto en una cruzada personal contra la religión. Pero ni la muerte de aquel ni el «retiro» de este han puesto fin al debate, que mantienen vivo los muchos seguidores de ambos.

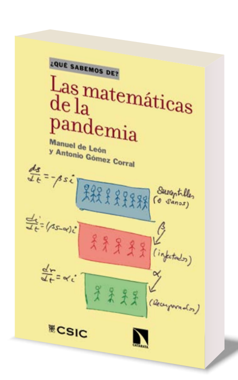
En un libro muy ameno, claro y equilibrado (aunque no por ello oculta su mayor inclinación hacia los postulados de Dawkins), Sterelny desgrana en dos bloques, uno dedicado a Dawkins y el otro a Gould, los puntos fuertes y débiles de ambas posturas. La pregunta que el autor se hace desde el comienzo es si la forma actual de la teoría evolutiva, la que a comienzos del siglo pasado se denominó síntesis moderna y que puso la genética y la selección natural en un marco teórico unificado, necesita ser fundamentalmente ampliada o no. Sterelny no ve aún indicios suficientes que apoyen esta necesidad. Pero no cierra la puerta, pues admite que hay cuestiones, como la biología del desarrollo, que no se encuentran aún lo suficientemente integradas en la teoría, y otras, como la epigenética, cuyo alcance es todavía desconocido.

En su versión original en inglés, el libro se publicó en 2001 y fue objeto de una segunda edición en 2009. Aunque el autor ha escrito un largo prefacio para poner un libro que ya es antiguo en el contexto actual, los desarrollos en genómica de los últimos años han revelado la inesperada importancia que el origen de la variabilidad genética puede tener en los posibles caminos evolutivos. Al respecto, la obra *The logic of chance* (2011), del biólogo Eugene Koonin, da información cumplida de estos avances. En ellos se observa, por ejemplo, cómo en el dominio molecular el azar desempeña un papel mucho más determinante de lo que se pensaba en los patrones evolutivos, algo que apoyaría las tesis de Gould. Hubiera sido deseable que Sterelny analizara tales cuestiones en su libro. Con todo, sigue tratándose de una lectura muy interesante que invita a la reflexión acerca de lo que sabemos y lo que aún ignoramos sobre la evolución biológica.

—José Cuesta
Universidad Carlos III de Madrid

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



LAS MATEMÁTICAS DE LA PANDEMIA
Manuel de León y Antonio Gómez Corral
Catarata-CSIC, 2020
ISBN: 978-84-1352-102-2
144 págs. (12 €)



VIAJE AL CENTRO DE UN AGUJERO NEGRO
Iván Martí Vidal
Institució Alfons el Magnànim, 2020
ISBN: 978-84-7822-886-7
236 págs. (17 €)

EL FUTURO POR DECIDIR
CÓMO SOBREVIVIR A LA CRISIS CLIMÁTICA
Christiana Figueres y Tom Rivett-Carnac
Debate, 2021
ISBN: 9788418056338
224 págs. (19,90 €)



DE MUJERES, HOMBRES Y MOLÉCULAS
NOTAS DE HISTORIA, ARTE Y LITERATURA DE LA QUÍMICA
Santiago Álvarez
Edicions Universitat de Barcelona, 2020
ISBN: 978-84-9168-336-0
460 págs. (29 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MARZO

1971

Psicoterapia en alza

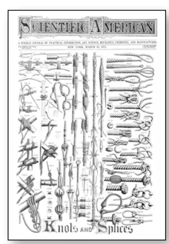
«En EE.UU., el tratamiento de las enfermedades mentales ha cambiado radicalmente en los últimos veinte años. Una de las novedades, muy poco conocida fuera del ámbito profesional de la psiquiatría, ha sido el desarrollo de un método de tratamiento llamado comunidad terapéutica. El término describe un procedimiento para gestionar una pequeña unidad psiquiátrica hospitalaria. Idealmente, una unidad debe reunir entre 20 y 40 pacientes; en un hospital grande podría haber más de una comunidad terapéutica. Un elemento clave del método es la relación estrecha entre los profesionales y sus pacientes, que comparten el trabajo y las actividades de la unidad y participan en la toma de decisiones que la afectan.»



1971



1921



1871

La política de las tarjetas de Navidad

«El patrón por el que enviamos y recibimos tarjetas de Navidad puede explicarse en función de ciertas características sociales, especialmente el estatus y las aspiraciones de ascenso social. Esta hipótesis, desarrollada por Sheila K. Johnson, la ha comprobado ella misma sobre el terreno y la ha publicado en *Trans-action*. La señora Johnson divide las tarjetas de Navidad en tres grupos: (1) recíprocas, (2) enviadas pero no recibidas y (3) recibidas pero no enviadas. Las recíprocas se intercambian con los parientes o con amigos de estatus social similar. También enviamos tarjetas a quienes nunca nos las envía pero con quienes deseamos tratar, y recibimos tarjetas de personas a quienes nunca se las enviamos pero que desean tratar con nosotros. Un estudiante de posgrado informó que el 70 por ciento de sus tarjetas fueron recíprocas, el 30 por ciento fueron enviadas hacia arriba y no recibió ninguna desde abajo.»

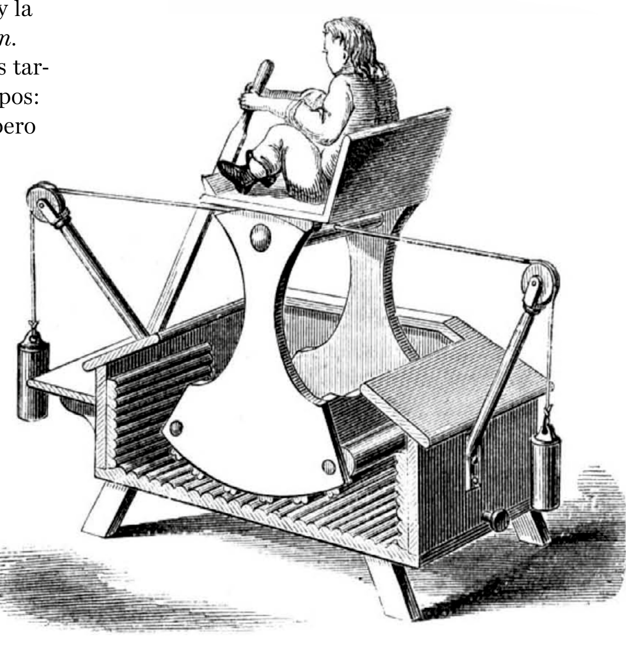
1921

Guerra al delito

«En un banco de Michigan el gas mostaza ahuyentó a tres ladrones. En la cámara acorazada del banco se habían colocado, unos días antes, tubos del gas como protección contra asaltantes. Cuando los cacos irrumpieron por las puertas, estallaron los tubos y aquellos huyeron, dejando tras de sí 85 centavos de su propio dinero y un caro juego de ganzúas. Pasaron horas antes de que pudiera entrarse sin peligro en el edificio. Solo había sido volada la primera puerta de la gran cámara, y la descarga de gas frustró el intento de los asaltantes.»

La edad de la Tierra

«El abate Theodore Moreaux, director del Observatorio de Bourges, ha ofrecido hace poco unas estimaciones de la edad de la Tierra y de cuando apareció en ella el fenómeno de la vida. Sitúa la edad en 500 millones de años, más o menos, y cree que la temperatura descendió hasta un punto compatible con la existencia de vida hace unos 250 millones de años. En comparación, el hombre fue un recién llegado al que concede solo unas decenas de miles de años, refutando así el cálculo de un científico alemán, quien hace poco daba 400.000 años como la probable antigüedad de nuestra especie.»



1871: Lavadora patentada, accionada por un vigoroso niño.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXIV, N.º 10, 4 DE MARZO DE 1871

1871

Sanguijuelas para usos médicos

«El uso generalizado de sanguijuelas en cirugía confiere gran importancia a su reproducción en los pocos lugares donde se crían. En Francia son productos de cultivo. En las Landas, cerca de Burdeos, se crían a cientos de miles, y se las abastece de nutrientes arrojando a los marjales animales moribundos desahuciados. Para ese fin se prefieren las vacas, desgraciadas bestias que, tras ser desangradas, pueden ser conducidas a un prado de buen pasto, donde se recuperan rápidamente para proveer de alimento fresco a las sanguijuelas; en cambio, los caballos y los asnos se hunden ante los ataques de aquellas. Los habitantes de la región próxima a la hermosa bahía de Arcachon siguen en gran medida esa práctica y envían a Burdeos hasta 1.500.000 sanguijuelas al año.»

Energía infantil

«El mérito de este invento (la aplicación de fuerza infantil a las lavadoras), ilustrado de modo singular en el grabado adjunto, pertenece a John Highbarger, de Sharpsburg (Maryland), que no hace mucho registró la patente. Un barreño de paredes acanaladas contiene la ropa, el agua y el jabón. La oscilación de una silla mecedora lava la ropa, vaivén producido manualmente por el operador accionando una palanca, tal como se muestra. La idea de aprovechar la fuerza de un niño es ciertamente novedosa y, sin duda, divertida para el operador.» *Hacia 1875, había en EE.UU. casi 2000 patentes de lavadoras manuales.*



DEPORTE

Una cuestión de testosterona

Grace Huckins

Se está discriminando a algunas atletas por sus niveles de esta hormona.



ECOLOGÍA

Los cuidadores de los suelos

Jérôme Cortet

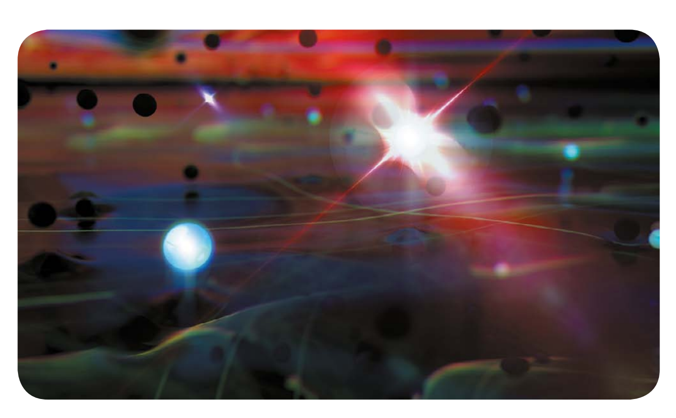
Los colémbolos, unos artrópodos diminutos y a menudo desconocidos, abundan en los suelos y contribuyen a su calidad.

COMUNICACIÓN

Bulos y sensacionalismo en la divulgación de la física

Tomás Ortín y Ángel Uranga

La comunicación de la ciencia vive un momento dorado gracias al auge de los nuevos medios de comunicación. Sin embargo, eso ha derivado en una avalancha informativa en la que los problemas clásicos del periodismo se han multiplicado.



COSMOLOGÍA

Enigma cósmico

Clara Moskowitz

El valor sorprendentemente pequeño de la constante cosmológica es uno de los mayores misterios sin resolver de la física.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas

EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz

DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay

DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado

PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau

SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga

SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Stephen Pincock
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Valencia, 307 3.º 2.ª
08009 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *El arte caleidoscópico de los corales*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *El enigma de los protocúmulos de galaxias*; Fabio Teixidó: *Apuntes, Pronósticos del tiempo para 28 días, Un planeta dinámico* y *Agua de montaña*; Gonzalo Claros: *Desarrollan un sensor para medir la temperatura intracelular* y *Los estragos inmunitarios de la COVID-19*; Javier Grande: *La presencia de fosfano en Venus, cuestionada de nuevo*; Carlos Lorenzo: *El auténtico* Dilophosaurus; Alfredo Marcos: *Una solución al problema escéptico de la inducción*; Mercè Piqueras: *Vigilemos los microbios del Ártico*; Ana Mozo: *Las células tramposas en el cáncer*; J. Vilardell: *El misterio de Racetrack Playa* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España